

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГУБАШОВА ВАЛЕНТИНА ЄВГЕНІВНА**

УДК 624.1

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОБґРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ**  
**ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ В СКЛАДНИХ**  
**ГЕОТЕХНІЧНИХ УМОВАХ**

05.15.09 – геотехнічна і гірнича механіка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_В.Є. Губашова

Науковий керівник Зуєвська Наталя Валеріївна, доктор технічних наук,  
професор

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Губашова В. Є. Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 "Геотехнічна і гірнича механіка". – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2021.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах.

Аналіз попередніх досліджень технології струменевої цементації показав, що не дивлячись на те, що технологія почала свій розвиток з 70-х років минулого століття, є ще багато питань, які мають бути дослідженими: зв'язок технологічних параметрів з характеристиками створеного ґрунтоцементного масиву, вплив технологічних процесів на оточуюче ґрунтове середовище, тощо.

В процесі роботи проаналізовано сучасний стан нормативної бази стосовно проєктування та виконання ґрунтоцементних елементів за струменевою технологією. Відзначено, що на сьогоднішній день на території України практично відсутні нормативні документи, які визначають порядок розрахунку, проєктування та виконання струменево–цементацийних елементів.

Більшість сучасних українських досліджень ґрунтоцементу спрямовані на бурозмішувальні технології, в яких розглянуті і широкий діапазон ґрунтів, і чисельні значення міцності отриманого матеріалу. Але використовувати ці значення міцності для елементів, що виконуються за струменевою технологією, є помилкою, адже при бурозмішувальній технології ґрунтоцемент – це продукт механічного перемішування, іноді з великими ґрунтовими включеннями, а при ін'єкційній технології ґрунтоцемент утворюється руйнуванням та перемішуванням високонапірним струменем, що

забезпечує формування більш однорідного матеріалу. В іноземній технічній літературі в більшості випадків на графіках міцнісних характеристик ґрунтоцементу зустрічаються типи ґрунтів, що не розповсюджені в Україні. Тобто при виконанні проєкту з застосуванням струменево–цементацийних елементів на території нашої країни в більшості випадків неможливо знайти значення очікуваних характеристик ґрунтоцементного матеріалу.

Існуючі методики розрахунків ґрунтоцементних елементів в основному направлені на отримання таких даних, як витрати цементного розчину під час виконання струменево–цементацийних елементів будь–якої конфігурації. І тільки деякі автори пропонують розрахунок радіусу розмиваючого струменя, але ці методики та підходи базуються на багатьох експериментальних параметрах, які автори пропонують отримувати на будівельних майданчиках під час роботи. Тобто для інженерів–проєктувальників, що не мають змоги виконати ряд експериментальних досліджень, застосування цих методик неможливе.

При аналізі літературних даних стосовно ґрунтових умов, в яких виконуються ґрунтоцементні елементи, виявлена відсутність прикладів застосування струменево–цементацийних колон в складних інженерно–геологічних умовах, наприклад, у напівскельних ґрунтах. Це поставило питання вивчення можливості застосування ґрунтоцементних колон для підсилення основ фундаментів в умовах напівскельних прошарків ґрунту, в яких виконання колон є проблематичним.

На основі вивчених та проаналізованих літературних даних в дисертаційній роботі були поставлені і розв’язані наступні питання:

1. На основі дослідних даних виконано аналіз взаємозв’язку технологічних параметрів струменевої цементації з діаметром ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів.

Побудовані залежності швидкості підйому робочого інструменту від його діаметру дозволили зробити висновок, що діаметр сопла управляє співвідношенням між тиском і витратою струменя, тобто потужністю

струменя. Отже, можна розрахувати діаметр сопла на гідромоніторі для того, щоб отримати тиск і необхідні витрати струменя, беручи до уваги щільність використовуваного розчину. Отримані графічні дані не тільки узагальнюють залежність між геометричною характеристикою ґрунтоцементної колони і технологічним параметром, але і дозволяють полегшити підхід для вибору робочих параметрів бурового інструменту.

На основі отриманих графіків залежності енергії цементного високонапірного струменя від діаметру ґрунтоцементного елемента та отриманих експоненціальних залежностей розроблено методику визначення діаметру в залежності від технологічних параметрів. Практичне значення отриманих залежностей перевірено на прикладі виконаних будівельних об'єктів. На основі виконаних розрахунків та порівняльного аналізу дослідних параметрів ґрунтоцементних колон були введені коригуючі коефіцієнти для різних ґрунтових умов.

Розроблена в дисертаційній роботі методика дозволить виконувати проєктування ґрунтоцементних колон та виконання підсилення ґрунтових масивів за їх допомогою без попереднього проведення випробувань та експериментальних досліджень.

2. Для дослідження впливу струменевої цементації на оточуюче ґрунтове середовище на будівельних об'єктах відібрано ґрунтові зразки з наступним дослідженням фізико–механічних характеристик. Для вивчення зміни міцнісних характеристик ґрунтоцементного матеріалу колон струменевої цементації на всіх дослідних майданчиках відібрано зразки матеріалу з подальшим випробуванням їх на стиск.

Ґрунтуючись на дослідних даних виконання ґрунтоцементних елементів в різних інженерно–геологічних умовах, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів їх міцності на стиск і побудовано графік залежності діапазону значень міцності від виду ґрунту. Отримані значення в подальшому дозволять прогнозувати значення міцності при проєктуванні конструкцій з використанням ґрунтоцементних елементів.



Аналізуючи дослідні данні, доведено змінення фізико–механічних властивостей ґрунту, що оточує струменево–цементацийний елемент, та показано графічно наявність зони покращеного ґрунту. Дослідні данні з формування зони покращеного ґрунту навколо виконаної ґрунтоцементної колони спростовують припущення, зроблені в деяких наукових роботах, про відсутність впливу високонапірного струменя на оточуюче ґрунтове середовище за межами радіуса розмиву.

3. На основі дослідних даних з будівельних майданчиків та розрахованого значення залишкового тиску, що створює високонапірний струмінь цементного розчину в межах оточуючого ґрунтового масиву після того, як процес руйнування та виносу ґрунту підчас формування ґрунтоцементної колони з відповідними витратами енергії закінчений, було змодельовано вплив залишкового тиску в програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

Результати моделювання підтвердили формування навколо ґрунтоцементної колони зони ґрунту з покращеними фізико–механічними характеристиками. Чисельне значення розміру зони збігається з раніше виконаними натурними дослідженнями на об'єктах, а зміна щільності ґрунту відповідає даним фізико–механічних властивостей зразків, відібраних на цих об'єктах. На основі отриманих результатів відмічено, що найбільший вплив на оточуючий ґрунт при виконанні ґрунтоцементної колони за струменевою технологією отримано в пісках середньої щільності, найменший – в твердих глинах.

На розрахунковій моделі підсилення ґрунтової основи існуючої будівлі показано покращуючий ефект введення зони поліпшеного ґрунту, що дало змогу зменшити проєктну кількість ґрунтоцементних колон на 15 % та, відповідно, зменшити економічні витрати на виконання будівельних робіт.

4. Для складних інженерно–геологічних умов (напівскельні ґрунти) розроблено метод підсилення ґрунтових основ складно–компонентними системами, що складаються з елементів двох геотехнологій – анкерних

елементів типу Ischebeck Titan та ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією. Виконано числове моделювання за допомогою Plaxis 3D Foundation висотної будівлі з монолітного залізобетону, в основі якої присутній шар напівскельного ґрунту – вапняку. В роботі показано спільну роботу елементів підсилення, виконаних за двома різними технологіями, де в роботу елементів підсилення включено шар вапняку, розташований в основі. Компонування двох технологій дало можливість створити складно–компонентний елемент підсилення. При виконанні розрахунків до моделі будівлі було прикладене не тільки навантаження від споруди, а і навантаження, що моделює зрушуючі зусилля, що дало змогу в повному обсязі оцінити позитивні аспекти комбінування двох технологій.

*Наукова новизна* отриманих результатів дослідження полягає у тому, що *вперше*:

- на підставі теоретичних досліджень отримано експоненціальні залежності діаметра ґрунтоцементного елемента круглого перерізу від енергії високонапірного струменя цементного розчину і швидкості підйому робочого інструменту, що дозволяють визначити очікуваний діаметр колони відповідно до технологічних параметрів обладнання;

- на основі порівняльного аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено поправочні коефіцієнти для співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів колони, які складають для піску і супіску  $K=0,8$ , для суглинку  $K=0,9$ , що дозволяє визначити реальний діаметр ґрунтоцементної колони в різних інженерно–геологічних умовах;

- на підставі математичного моделювання та експериментально визначено закономірності формування в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико–механічними параметрами в міжколонному просторі, що дозволяє зменшити на 15 % кількість ґрунтоцементних елементів при підсиленні ґрунтової основи існуючих будівель.

*Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в то, що:*

- розроблено рекомендації щодо співвідношення швидкості підйому робочого інструмента в залежності від проєктного значення діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням взаємозв'язку між технологічними параметрами – енергією і потужністю струменя та технічними параметрами обладнання – діаметром сопел на гідромоніторі і потужністю високонапірного насосу для різних типів ґрунтів;
- розроблено та промислово випробувано методику розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням ґрунтових зон з поліпшеними фізико–механічними параметрами в міжколонному просторі;
- удосконалено методику комп'ютерного моделювання управління напружено–деформованим станом основи будівлі під час її підсилення струменево–цементацийними елементами з урахуванням складних геотехнічних умов.

**Ключові слова:** струменева цементация, напружено–деформований стан, складні геотехнічні умови, технологічні параметри, ґрунтоцементний елемент, міцність на стиск, зона покращеного ґрунту, складно–компонентний елемент.

## ANNOTATION

**Gubashova V.E. Substantiation of rational technological parameters of jet grouting in difficult geotechnical conditions.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.15.09 "Geotechnical and mining mechanics". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to substantiation of rational technological parameters of jet grouting in difficult geotechnical conditions.

Analysis of previous studies of jet cementation technology has shown that despite the fact that the technology began its development in the 70s of last century, there are still many issues to be explored: the relationship of technological parameters with the characteristics of the soil–cement array, the impact of technological processes on the soil environment, etc.

In the course of work the current state of the normative base concerning designing and execution of soil–cement elements on jet technology is analyzed. It is noted that today on the territory of Ukraine there are almost no regulations that determine the procedure for calculation, design and implementation of jet– grouted elements.

Most modern Ukrainian studies of soil–cement are aimed at drilling technologies, which consider both a wide range of soils and the numerical values of the strength of the obtained material. But to use these strength values for elements made by jet technology is a mistake, because in drilling technology soil cement is a product of mechanical mixing, sometimes with large soil inclusions, and in injection technology soil cement is formed by destruction and mixing by high–pressure jet, forming a more homogeneous material. In the foreign technical literature in most cases on the graphs of strength characteristics of soil cement there are types of soils that are not common in Ukraine. That is, when implementing a project with the use of jet– grouted elements on the territory of our country in most cases it is impossible to find the value of the expected characteristics of the soil–cement material.

Existing methods of calculation of soil–cement elements are mainly aimed at obtaining such data as the cost of cement mortar during the execution of jet–cementing elements of any configuration. And only some authors offer the calculation of the radius of the blur jet, but these techniques and approaches are based on many experimental parameters that the authors propose to obtain on construction sites during operation. That is, for design engineers who are unable to perform a number of experimental studies, the application of these techniques is impossible.

The analysis of literature data on soil conditions in which soil-cement elements are performed revealed the absence of examples of application of jet-grouted columns in complex engineering-geological conditions, for example, in semi-rocky soils. This raised the question of studying the possibility of using soil-cement columns to strengthen the foundations in the conditions of semi-rocky layers of soil, in which the execution of the columns is problematic.

On the basis of the studied and analyzed literature data the following questions were asked and solved in the dissertation work:

1. Based on the experimental data, the analysis of the relationship between the technological parameters of jet grouting with the diameter of the soil-cement column in different types of soils.

1. The constructed dependences of the lifting speed of the working tool on its diameter allowed us to conclude that the nozzle diameter controls the ratio between the pressure and flow of the jet, i.e. the power of the jet. Therefore, it is possible to calculate the diameter of the nozzle on the hydromonitor in order to obtain the pressure and the required flow rates, taking into account the density of the solution used. The obtained graphical data not only summarize the relationship between the geometric characteristics of the soil-cement column and the technological parameter, but also facilitate the approach to the choice of operating parameters of the drilling tool.

2. Based on the obtained graphs of the dependence of the energy of the high-pressure cement jet on the diameter of the soil-cement element and the obtained exponential dependences, a method for determining the diameter depending on the technological parameters has been developed. The practical value of the obtained dependences is checked on the example of completed construction projects. Based on the performed calculations and comparative analysis of the experimental parameters of soil-cement columns, correction factors for soil conditions of Ukraine were introduced.

3. The method developed in the dissertation will allow performing the design of soil reinforcement without prior testing and experimental research.

2. To study the impact of jet cementation on the soil environment at construction sites, soil samples were taken, followed by a study of physical and mechanical characteristics. To study the change in the strength characteristics of the soil–cement material of jet cementation columns at all experimental sites, samples of the material were taken and then tested for compression.

4. Based on the experimental data of soil cement elements in different engineering and geological conditions on the territory of Ukraine, a comparative analysis of the obtained results of their compressive strength and a graph of the dependence of the range of strength values on the type of soil. The obtained values in the future will predict the value of strength in the design of structures using soil–cement elements.

5. Analyzing the experimental data, the change of physical and mechanical properties of the soil surrounding the jet–grouted element is proved, and the presence of the zone of improved soil is shown graphically. Experimental data on the formation of a zone of improved soil around the executed soil-cement column refute the assumptions made in some scientific papers that there is no impact of high–pressure jet on the soil environment outside the erosion radius.

3. Based on the experimental data from construction sites and the calculated value of residual pressure, which creates a high-pressure jet of cement mortar within the surrounding soil mass after the process of destruction and removal of soil during the formation of soil–cement column with appropriate energy costs. in the Plaxis 3D Foundation software package.

6. The simulation results confirmed the formation of a soil zone around the soil-cement column with improved physical and mechanical characteristics. The numerical value of the size of the zone coincides with the previously performed field studies on the objects, and the change in soil density corresponds to the data of physical and mechanical properties of the samples taken at these objects. Based on the obtained results, it is noted that the greatest impact on the surrounding soil during the execution of the soil-cement column by jet technology was obtained in sands of medium density, the smallest – in hard clays.

7. The calculation model of strengthening the soil base of the existing building shows the improving effect of the introduction of the improved soil zone, which allowed to reduce the design number of soil-cement columns by 15% and, accordingly, reduce economic costs for construction works.

4. For complex engineering–geological conditions (semi–rocky soils) a method of strengthening soil bases with composite–component systems consisting of elements of two geotechnologies – anchor elements of Ischebeck Titan type and soil–cement columns made by jet technology has been developed. Numerical modeling with the help of Plaxis 3D Foundation of a high-rise building made of monolithic reinforced concrete, based on a layer of semi-rocky soil – limestone. The paper shows the joint work of reinforcement elements made by two different technologies, where the work of reinforcement elements includes a layer of limestone located in the base. The combination of the two technologies made it possible to create a composite-component element of reinforcement. When performing calculations, not only the load from the structure was applied to the building model, but also the load modeling the shifting effort, which allowed to fully assess the positive aspects of combining the two technologies.

*The scientific novelty* of the obtained research results is that for *the first time*:

- on the basis of theoretical researches exponential dependences of diameter of soil–cement element of round section on energy of a high-pressure jet of cement mortar and speed of rise of the working tool are received, allowing to define expected diameter of a column according to technological parameters of the equipment;
- on the basis of comparative analysis of the results of experimental and theoretical studies, correction factors for the ratio of calculated and actual column diameters, which are for sandy soil and sand  $K=0.8$ , for loam  $K=0.9$ , which allows to determine the actual diameter of the soil-cement column in different engineering and geological conditions;
- on the basis of mathematical modeling and experimentally determined patterns of formation in soil massifs of zones with improved physical and

mechanical parameters in the intercolumn space, which allows to reduce by 15% the number of soil–cement elements while strengthening the soil base of existing buildings.

*The practical significance* of the obtained results of the work is that:

- recommendations for the ratio of lifting speed of the working tool depending on the design value of the diameter of the soil-cement column, taking into account the relationship between technological parameters – energy and power of the jet and technical parameters of equipment – diameter of nozzles on the monitor and high pressure pump capacity for different types of soils;
- developed and industrially tested methods for calculating the diameter of the soil-cement column, taking into account soil zones with improved physical and mechanical parameters in the intercolumn space;
- the technique of computer modeling of stress-strain state control of the building foundation during its reinforcement by jet-grouted elements is improved, taking into account complex geotechnical conditions.

**Key words:** jet grouting, stress-strain state, difficult geotechnical conditions, technological parameters, soil-cement element, compressive strength, zone of improved soil, complex-component element.



## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані *основні результати дисертації*.

### *Публікації у наукових фахових виданнях:*

1. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Использование метода струйной цементации (струйного инъецирования) грунтов при усилении фундаментов в сложных геологических условиях. *Вісник Криворізького Технічного Університету*. Кривий Ріг, 2011. Випуск 27. С.262–265.  
*Особистий внесок здобувача:* дослідження застосування струменевої цементації для підсилення ґрунтових основ фундаментів існуючих будівель.
2. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъецирования в качестве противofiltrационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций глубоких выемок в условиях плотной застройки. *Світ геотехніки*. 2011. №4. С. 19–21.
3. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Є. Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико–механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Науковий журнал "Енергетика: економія, технології, екологія"*. Київ, 2019. №4. С. 27–34.  
*Особистий внесок здобувача:* дослідження впливу високонапірного струменя на зміну фізико–механічних характеристик ґрунтів при виконанні ґрунтоцементних колон за струменевою геотехнологією.
4. Gubashova V. Experience of carrying out of ground–cement elements on the jet grouting technology in slags of a blast–furnace process (Досвід виконання ґрунтоцементних елементів по технології струменевої цементації в шлаках доменного виробництва). *Науково–технічний журнал "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві"*. Вінниця, 2019. Том 27 №2, с. 87–95.
5. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є. Моделювання підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ, 2020. №1 (46). С. 36–44.

*Особистий внесок здобувача:* моделювання підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами (комбінування ґрунтоцементних колон та анкерних паль) за допомогою геотехнічного розрахункового комплексу.

6. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Е. Особливості формування елементів струменевої цементації в заторфованому суглинку. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія "Технічні науки"*. Київ, 2020. Том 31 (70), №2. С. 198–202.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження особливостей формування ґрунтоцементних колон в заторфованих суглинках.

***У закордонних збірниках наукових праць інших держав, які входять до  
ОЕСР та Європейського Союзу:***

7. Gubashova V. Experience of performance of the horizontal anti–filtration screen with the application of double fluid jet grouting. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. Poland, 2020. №1(53) Pp. 28–34.

Наукові праці, які ***додатково відображають наукові результати дисертації.***

***Публікації у наукових фахових виданнях:***

8. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є., Шайдецька Л.В. Особливості врахування впливу будівельної техніки на стійкість конструкції котловану при щільній міській забудові. *Збірник наукових праць НГУ.–Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»*. 2018. №54. С.170–183.

*Особистий внесок здобувача:* застосування геотехнічних розрахункових комплексів для виконання моделювання та дослідження напружено-деформованого стану та впливу на елементи огородження.

9. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Стабілізація ґрунтового масиву за допомогою ін'єкційних анкерів. Порівняльний аналіз особливостей проектування.

*Збірник наукових праць Національного гірничого університету "Дніпровська Політехніка"* Дніпро, 2020. №60–06. с. 58–68.

*Особистий внесок здобувача:* аналіз проектних підходів та моделювання ін'єкційної частини ґрунтового анкера з подальшим дослідженням напружено-деформованого стану ґрунтового масиву за допомогою геотехнічного розрахункового комплексу.

***У закордонних періодичних виданнях:***

10. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Обзор технологии струйной цементации и ее применение в городском строительстве. *Elmi-nəzəri jurnal "Yer Və İnsan"*. Azerbaijan, 2020. №01 (13). Рр. 67–72.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження застосування струменевої геотехнології для рішення різноманітних задач в міському будівництві.

***У інших науково-технічних виданнях:***

11. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъекирования в качестве противофильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций. *Міжвідомчий науково–технічний збірник "Будівельні конструкції"*. Київ, 2011. №75. Книга 2. С.635–642.

***Публікації за матеріалами конференцій:***

12. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Изменение напряженно–деформируемого состояния грунтов при устройстве глубоких выемок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доповідей 71 Міжнародної науково–технічної конференції*. Дніпропетровськ, 2011. С.231–232;
13. Губашова В.Е. Сравнение геотехнических расчетных комплексов на примере расчета ограждения котлована в г. Киеве. *Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Международной научно–технической конференции, посвященной 60–летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90–летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского* (Минск, 23–25 октября 2013 г.). В 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2013. С. 212–219.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУМЕНЕВОЇ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ	
1.1 Характеристика технології струменевої цементації та напрямків її використання.....	25
1.2 Аналіз сучасного стану нормативної бази проектування та застосування струменевої технології.....	31
1.3 Аналіз ефективності існуючих методик визначення технологічних параметрів технології струменевої цементації.....	36
Висновки за розділом 1.....	47
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕВОГО ІН'ЄКТУВАННЯ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОТРИМАНИХ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	
2.1 Основні технологічні параметри та характеристики ґрунтоцементного матеріалу.....	50
2.2 Експериментальні результати дослідження залежності між діаметром струменево–цементацийної колони і технологічними параметрами .....	57
2.3 Методика визначення витрати цементного розчину і діаметра ґрунтоцементних колон в залежності від технологічних параметрів.....	70
Висновки за розділом 2.....	77
РОЗДІЛ 3 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНИ УЩІЛЬНЕНОГО ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ ТА ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЇЇ УТВОРЕННЯ	
3.1 Вплив процесу струменевої цементації на фізико–механічні характеристик масиву.....	80

3.2 Експериментальні дані з дослідження ґрунтоцементної основи в різних типах ґрунтів.....	82
3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	109
3.4 Розрахунок залишкового тиску струменя цементного розчину та числове моделювання впливу на оточуючий ґрунт .....	114
3.5 Використання виділеної покращеної зони навколо ґрунтоцементного елемента при моделюванні підсиленої основи.....	120
Висновки за розділом 3.....	128
<b>РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ СКЛАДНО–КОМПОНЕНТНИМИ СИСТЕМАМИ</b>	
4.1 Особливості поєднання технологій струменевого ін'єктування та Ішебек Титан (Ischebeck Titan).....	132
4.2 Обґрунтування вибору моделі.....	141
4.3 Результати моделювання.....	143
Висновки за розділом 4.....	161
<b>РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ</b>	
5.1 Порівняльний аналіз витрат на будівельні роботи.....	164
Висновки за розділом 5.....	166
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>167</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>169</b>
<b>ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....</b>	<b>180</b>
<b>ДОДАТОК Б. Локальний кошторис на будівельні роботи.....</b>	<b>185</b>
<b>ДОДАТОК В. Акти впровадження.....</b>	<b>191</b>

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Технологія струменевої цементації або струменевого ін'єктування (Jet grouting method) – сучасна геотехнічна технологія перетворення будівельних властивостей ґрунтів з метою їх поліпшення – заснована на одночасному руйнуванні і перемішуванні ґрунту високонапірним струменем розчину в режимі "перемішування–на–місці" ("mix–in–place").

Європейські норми EN 12716 пояснюють поняття "струменева цементація" ("jet grouting") як "спосіб, який полягає в руйнуванні структури ґрунту або м'якої породи і в перемішуванні або частковому заміщенні його цементуючою речовиною, при цьому руйнування структури відбувається струменем рідини високої енергії, струмінь рідини так само може служити цементуючою речовиною", тобто струменева цементація заснована на процесі руйнування і перемішування на місці елементів ґрунту з будівельним розчином і не є процедурою ін'єкції під тиском в ґрунт.

Технологія струменевого ін'єктування дозволяє використовувати її при спорудженні об'єктів підземного будівництва, а саме: підземних несучих і протифільтраційних конструкцій, горизонтальних або похилих плит, елементів будівель і споруд, штучних основ, стін і підлог заглиблених приміщень, в тому числі підземних гаражів; при посиленні фундаментів існуючих будівель і споруд, підпірних стін, огорож котлованів, горизонтальних підземних протифільтраційних екранів, протизсувних конструкцій, при закріпленні ґрунтових масивів для проходження підземних тунелів, колодязів великого діаметру з днищами та ін.

У прогресуючому ритмі забудови міської території гостро стоїть питання виконання нового будівництва на прилеглих територіях до існуючих об'єктів, часто таких, що знаходяться в аварійному стані. В зв'язку з тим, що технологія струменевої цементації характеризується відсутністю ударних і вібраційних навантажень, а малогабаритні бурові машини дозволяють виконати роботи в

стиснених умовах, однією з найпоширеніших областей застосування струменевого ін'єктування є підсилення основ фундаментів існуючих будівель, включаючи реконструкцію історичних пам'яток архітектури.

Не дивлячись на таке широке застосування досліджуваної технології в будівництві, багато питань залишаються на відповідальності виконавців робіт і не висвітлюються в літературі та в нормативних документах: підхід до аналізу очікуваного діаметру ґрунтоцементної колони, взаємозв'язок технологічних параметрів та їх вибір, діапазони міцності ґрунтоцементу, отриманого за струменевою геотехнологією, в українських будівельних умовах, вплив на оточуюче ґрунтове середовище при виконанні струменево–цементацийних елементів, застосування технології в складних інженерно–геологічних умовах.

Всі перелічені запитання обумовлюють необхідність розвитку і вдосконалення технологічних параметрів технології струменевої цементації та методик їх визначення з урахуванням геотехнічних характеристик ґрунтового масиву, та є **актуальним науковим напрямком дослідження.**

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до НДР: «Наукові основи ресурсозберігаючих технологій гірництва та геотехнічного будівництва (№ ДР 0115U005398).

### **Мета і завдання дослідження.**

Метою дисертаційної роботи є удосконалення технології струменевої цементації через встановлення закономірностей формування ґрунтових зон з поліпшеними фізико–механічними характеристиками.

Вказана мета досягається вирішенням наступних завдань:

- аналіз існуючих методик розрахунку робочих параметрів технології струменевої цементації в зв'язку з геометричними характеристиками проєктованих ґрунтоцементних елементів;
- встановлення закономірностей формування зон з поліпшеними фізико–механічними параметрами при використанні струменевої цементації;

- експериментальне дослідження напружено–деформованного стану ґрунтового масиву підсиленого елементами струменевої технології;
- виконання числового моделювання процесу підсилення ґрунтового масиву основи існуючої будівлі ґрунтоцементними елементами круглого перерізу, використовуючи програмні геотехнічні комплекси, основані на методі кінцевих елементів;
- розробка методики розрахунку діаметру ґрунтоцементної колони в залежності від технологічних параметрів..

*Об’єкт дослідження* – процеси формування ґрунтоцементних колон в ґрунтових масивах.

*Предмет дослідження* – технологічні параметри армування масивів за участі ґрунтових зон підвищеної щільності в системі струменево–цементацийних елементів.

**Методи дослідження.** Для розв’язання поставлених завдань у роботі використовувались сучасні методи наукових досліджень: аналіз і узагальнення сучасних досягнень з удосконалення технології струменевої цементації для армування ґрунтових масивів; експериментальні дослідження в натурних умовах для визначення зміни фізико–механічних характеристик ґрунту після армування; методи математичної статистики – для обробки експериментальних даних та встановлення залежності розподілу міцності ґрунту в просторі навколо ґрунтоцементного елементу; математичне моделювання МКЕ – для встановлення залежності зміни технологічних параметрів від геометричних параметрів струменеві–цементацийних елементів; техніко–економічний аналіз – для оцінки доцільності практичної реалізації отриманих результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів**, що виносяться на захист, представлена науковими положеннями, в яких *вперше*:

- на підставі теоретичних досліджень отримано експоненціальні залежності діаметра ґрунтоцементного елементу круглого перерізу від енергії високонапірного струменя цементного розчину і швидкості підйому робочого



інструменту, що дозволяють визначити очікуваний діаметр колони відповідно до технологічних параметрів обладнання;

– на основі порівняльного аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено коригуючі коефіцієнти для співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів колони, які складають для піску і супіску  $K = 0,8$ , для суглинку  $K = 0,9$ , що дозволяє визначити реальний діаметр ґрунтоцементної колони в різних інженерно–геологічних умовах;

– на підставі математичного моделювання та експериментально визначено закономірності формування в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико–механічними параметрами в міжколонному просторі, що дозволяє зменшити на 15% кількість ґрунтоцементних елементів при підсиленні ґрунтової основи існуючих будівель.

**Практичне значення отриманих результатів** роботи полягає в тому, що:

– розроблено рекомендації щодо співвідношення швидкості підйому робочого інструмента в залежності від проєктного значення діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням взаємозв'язку між технологічними параметрами – енергією і потужністю струменя та технічними параметрами обладнання – діаметром сопел на гідромоніторі і потужністю високонапірного насосу для різних типів ґрунтів;

– розроблено та промислово випробувано методику розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням ґрунтових зон з поліпшеними фізико–механічними параметрами в міжколонному просторі;

– удосконалено методику комп'ютерного моделювання управління напружено–деформованим станом основи будівлі під час її підсилення струменево–цементацийними елементами з урахуванням складних геотехнічних умов.

Розроблена методика розрахунку параметрів ґрунтоцементних елементів, виконаних за технологією струменевої цементації прийнята до впровадження україно–французьким спільним підприємством СП ТОВ «Основа–Солсиф», використана в навчальному процесі кафедри геоінженерії, а також може використовуватися підприємствами, що займаються проєктуванням та виконанням будівельних об'єктів з улаштуванням ґрунтоцементних елементів.

Результати дисертаційних досліджень прийнято для впровадження в будівельних компаніях СП ТОВ "Основа–Солсиф", "Геопік" та в науково–дослідному інституті ДП НДІБК, що підтверджується відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача** в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені у дисертаційній роботі.

Дисертація є самостійною роботою автора. Формулювання мети роботи, вибір методів дослідження, обробка експериментальних даних та встановлення теоретичних залежностей виконані безпосередньо дисертантом під контролем наукового керівника. Автору належить ідея постановки завдань, безпосередня участь і керівництво у проведенні досліджень, інтерпретація результатів.

Основні наукові положення та результати досліджень опубліковані у фахових виданнях, а також доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

У складі робочої групи проєктного відділу Департаменту спеціальних і гідротехнічних робіт ТОВ СП "Основа–Солсиф" автор прийняла участь в розробці проєктної документації із застосуванням технології струменевої цементації для 38 об'єктів на території України, Білорусі, Азербайджана, з яких 2 проєкти – підсилення ґрунтової основи при реконструкції Католицького костелу середини XVI століття в м. Белз, Львівська область і Андріївської церкви XVIII століття, м. Київ.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та окремі результати роботи доповідались та обговорювались на дев'яти міжнародних науково–практичних конференціях та семінарах кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського»:

- 3–rd Soletanche Bachy Group Designers meeting, London, UK, 3–4 December, 2008;
- 71 Международная научно–практическая конференция "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта", Восточный научный центр транспортной академии Украины, г. Днепропетровск, 14–15 апреля 2011 года;
- Третя науково–практична конференція з іноземною участю «Застосування передових технологій в цивільному та промисловому будівництві», СП ТОВ «Основа–Солсиф», ДП "НДІБК", Національний транспортний університет та Київський національний університет будівництва і архітектури. м. Київ, 24 травня 2012 року;
- Восьма всеукраїнська науково–технічна конференція "Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування", Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, 18–20 листопада 2013 р.;
- Международная научно–техническая конференция, посвященная 60–летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90–летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского "Геотехника Беларуси: наука и практика", г. Минск, 23–25 октября 2013 г.;
- Міжнародна науково–технічна конференція "Інноваційні технології в будівництві", Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 13–15 листопада 2014 р.;
- 5–th Soletanche Bachy Group Designers meeting, Budapest, Hungaria, 8–9 December 2011;
- 2<sup>nd</sup> ECE Safety Seminar, Soletanche Bachy, Bucharest, Rumania, 5–7 may 2017;

– Третя Всеукраїнська науково–технічна конференція «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання», ДП НДІБК. м. Київ, 24–25 травня 2017.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 13 наукових працях, у тому числі, 9 статей у фахових виданнях, (з них 1 стаття в періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до ОЕСР та Європейського Союзу), 1 стаття в закордонному періодичному виданні, 2 тези доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференціях, 1 стаття в інших виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 193 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, трьох додатків, списку використаних літературних джерел, який містить 106 найменувань. Основний текст викладено на 132 сторінках друкованого тексту, містить 115 рисунків, 26 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУМЕНЕВОЇ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ

#### 1.1 Характеристика технології струменевої цементації та напрямків її використання

Технологія руйнування ґрунтів за допомогою водяних струменів (гідроенергія) вже давно застосовувалася для виїмки і розробки ґрунту [68, 101]. Ще в середньовіччі відзначено її використання в гірничовидобувній промисловості. Однак практичне застосування струменя, що володіє високим тиском і енергією, для розробки ґрунту мало місце в Японії в кінці 1960–х, початку 1970–х років [98, 99, 105, 106].

Струменеве цементування з'явилося в якості альтернативи до хімічного ін'єктування, яке було не тільки дорогим, але і токсичним методом. У 1970–х роках "колонне поліпшення" стало доступною технологією [98]. В подальшому розроблена і випробувана на практиці технологія покращення будівельних властивостей ґрунтів поширилася на території Європи, далі в Південній і Північній Америці, на Далекому Сході, Азії та Африці.

На території США струменева цементація отримала широке застосування і розповсюдження в різних областях з початку 1980–х років [56].

Таким чином, геотехнологія, заснована на одночасному руйнуванні і перемішуванні ґрунту високонапірним струменем розчину в режимі "перемішування–на–місці" ("mix–in–place"), дійшла до наших днів як технологія струменевої цементації ґрунту.

Широко відомі дослідження явища руйнування природної структури та перемішування ґрунту методом струменевої цементації вченими Miki G. [88, 89], Tornaghi R. [103], Shibazaki M. [98, 99], Kauschinger JL та інших [83, 84], Bell A.L. [53], Covil C.S. і Skinner A.E. [60], Croce P., Flora A., Modoni G. [61, 62,

63, 64, 65, 66, 67, 92], Vleeschauwer Y. [104], Morey J [93, 94], Imanishi H. [79], Bergschneider B. [54]

На території Росії істотний внесок в розвиток технології струменевої цементації було зроблено кандидатом технічних наук Хасінім М. Ф. [46, 47], який провів експериментальні роботи в цій області в період 1976–83 рр. В подальшому дослідження технологічних параметрів струменевої цементації і одержуваного ґрунтоцементного матеріалу продовжені Бройдом І. І. [2, 3, 4] і Малінінім А. Г. [33, 34, 35, 36, 37], Ібрагімовим М. Н. [77, 78].

В Україні над питаннями створення ґрунтоцементу працюють Зоценко М. Л. [20, 21, 22, 23, 24], Винніков Ю. Л. [6, 7, 8], Киричек Ю. А. і Комиссаров Г. В. [17, 18, 19], Власов С. Ф. [9, 10, 11].

Основною ідеєю технології струменевої цементації є здійснення технологічних процесів з метою зміни характеристик ґрунтів, створення на їх основі матеріалів з необхідними властивостями і формування із зазначених матеріалів підземних елементів з заданими параметрами.

Залежно від кількості потоків рідини, що беруть участь в процесі формування струменево–цементацийних елементів, технологія поділяється на наступні основні види: однокомпонентну, двокомпонентну і трикомпонентну струменеву цементацію.

*Однокомпонентний метод* струменево–цементацийної технології полягає в тому, що і руйнування і цементация ґрунту відбувається за допомогою цементного розчину, що подається під високим тиском (кілька десятків МПа) в єдиному потоці через насос до струменевого монітора [73]. На виході з монітора швидкість струменя розчину зменшується дуже швидко, руйнівна ефективність однокомпонентного (простого) струменя у напрямку від осі свердловини обмежена, "радіус дії" простого струменя в ґрунті дорівнює кільком десяткам сантиметрів. В результаті обробки ґрунту однокомпонентним струменем формується колона від 0,4 до 1,4 м в діаметрі. Застосування однокомпонентної технології найпоширеніше в світі [39, 40, 41, 42, 80].

В *двохкомпонентній технології* існує два методи: перший – руйнування і цементация ґрунту відбувається за допомогою двох рідин, які транспортуються окремо одна від одної до монітора, другий – руйнування і цементация ґрунту виконується за допомогою однієї рідини, оточеної потоком повітря, а рідина і повітря так само подаються до сопла окремо один від одного.

В *двохкомпонентній технології* з водою застосовуються дві рідини – це вода і розчин. Ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, що подається у верхню частину монітора (кілька десятків МПа), в той же час цементування відбувається за допомогою відокремленого струменя розчину під низьким тиском (кілька МПа), що подається в нижню частину монітора. В даний час ця технологія рідко застосовується на території Європи і США.

В *двохкомпонентній технології* з повітрям застосовуються два потоки – повітря і розчин. Руйнування і цементация ґрунту, так само, як і в *однокомпонентній технології*, відбуваються за допомогою струменя розчину, поданого під тиском в кілька десятків МПа, але функції розмивання струменя розчину допомагає кільцеподібний струмінь повітря, що подається окремо під низьким тиском (кілька сотень кПа) з компресора до монітора. Струмінь стисненого повітря підтримує швидкість струменя розчину з віддаленням від сопла. Передбачається, що він створює оболонку навколо струменя розчину і захищає від тертя.

Практичне застосування та вибір оптимальних технологічних параметрів для *двохкомпонентної струменевої цементации* здобувачем розглянуті в роботі [75].

Сутність *трикомпонентної технології* полягає в тому, що руйнування і цементация ґрунту відбуваються за допомогою трьох потоків (вода, повітря і розчин), що подаються до монітора окремо.

Так само, як і в *двохкомпонентній технології* з водою, ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, а цементация відбувається струменем розчину, що подається під низьким тиском. Як і при

двокомпонентній технології з повітрям, ефективність руйнуючого струменя (на цей раз у воді ) поліпшена кільцевим струменем повітря.

Струменева цементация – це руйнування структури ґрунту або м'якої породи і перемішування або часткове заміщення його цементуючою речовиною, при цьому руйнування ґрунту відбувається за рахунок рідкого струменя, що володіє великою енергією, а сама рідина виконує цементуючу функцію [72].

Саме тип і фізико–механічні властивості ґрунтів, з яких виконується струменево–цементацийний елемент, будуть одними з основних чинників, що впливають на геометричний розмір елементів і міцність ґрунтоцементного матеріалу.

Наприклад, Burk G.K. в 2002 році [57] представив діапазон ґрунтів, до яких може бути застосована досліджувана технологія. Як він зазначив у класифікації (рис. 1.1), різні типи ґрунтів показують різні характеристики ерозійності.



Рисунок 1.1 – Характеристика ерозійності ґрунтів, представлена Burk G.K.



Відповідно до характеристики, що показана на рисунку 1.1, незв'язні ґрунти відносно легко зруйнувати і вони є фактично самоерозійними при обробці їх турбулентним впливом. В іншому кінці шкали – важко руйнована пластична глина, оскільки вона зв'язана когезією. Необхідно відзначити, що будь-яких швидкостей підйому недостатньо, щоб зруйнувати глину на частки, співрозмірні з зернами піску. Пластичні глини, наприклад, руйнуються на скибки і частини, а не окремі дрібні частинки, що часто є причиною закупорки кільцевого простору і втрати виходу пульпи на поверхню.

З Burk G. K., щодо широкого застосування технології, згодні Covil C. S. і Skinner A. E. [60], в той час як інші дослідники висловлюють деякі сумніви щодо дрібнозернистих ґрунтів, наприклад Bell A. L. [53]. Інші автори: Kanematsu H., як описано у Covil C. S. і Skinner A. E. [60], Shibasaki M. [98, 99], заявляють, що однокомпонентну струменеву цементацію слід застосовувати тільки для дуже низьких значень стандартного пенетраційного тесту SPT (зв'язні ґрунти  $N < 5-10$ , піщані ґрунти  $N < 15$ ), але не наведено ніяких пояснень для таких певних меж.

Професор P. Lunardi в своїй роботі [86] зазначив, що успішне виконання струменевої цементації можливе в будь-яких ґрунтах, незалежно від розміру часток і коефіцієнта фільтрації, за винятком твердого зв'язного ґрунту, міцність якого не може бути подолана струменем. У дрібнозернистих ґрунтах зовнішня поверхня колони струменевого ін'єктування чітко виражена і має правильну форму. У крупнозернистих і гетерогенних ґрунтах, навпаки, поверхня неправильної форми з систематичним "кореневим ефектом", оскільки в разі слабких прошарків ґрунту цементний розчин проникає в навколишній ґрунтовий масив, створюючи навколо колони лінзи з цементного розчину, що розходяться від поверхні колони.

На території України діапазон ґрунтів, в яких існує можливість виконувати струменево-цементаційні елементи різної форми, досить широкий. На прикладі об'єктів, виконаних спільним українсько-французьким підприємством "Основа-Солсиф", необхідно відзначити, що застосування

технології струменевої цементації було перевірене і в галечникових ґрунтах м. Івано–Франківська, і в заторфованих ґрунтах м. Львова, і практично у всіх типах ґрунтів м. Києва та Київської області. На рисунку 1.2 показано зовнішній вигляд колон струменевої цементації, виконаних в а) сухих лесових супісках, м. Київ та в б) водонасиченому заторфованому суглинку, м. Львів.

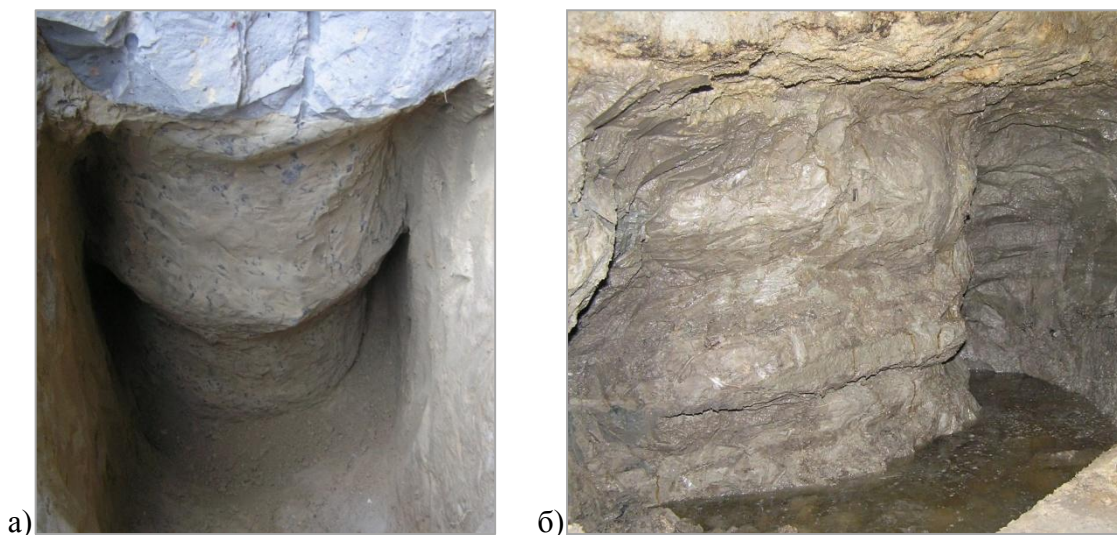


Рисунок 1.2 – Колони струменевої цементації, виконані в різних геологічних умовах: а) сухі лесоподібні супіски, б) водонасичені заторфовані суглинки

На рисунку 1.2 візуально можна спостерігати залежність однорідності поверхні від типу ґрунту, в яких виконувались колони струменевого ін'єктування.

Технологія струменевого ін'єктування дозволяє використовувати її при вирішенні різних завдань підземного будівництва, а саме: влаштуванні підземних несучих і протифільтраційних конструкцій [14], горизонтальних або похилих плит, елементів будівель і споруд, штучних основ [13, 49, 91], стін і підлог заглиблених приміщень, в тому числі підземних гаражів, влаштуванні коренів ґрунтових анкерів [58], при підсиленні фундаментів існуючих будівель і споруд [27, 28, 31, 55, 74, 85, 97], підпірних стін, огороження котлованів, горизонтальних підземних протифільтраційних екранів [12, 75, 76], протизсувних конструкцій [87], закріплення ґрунтових масивів для проходки підземних тунелів [52], колодязів великого діаметру з днищами і багатьох інших споруд [39, 40, 41, 42, 44, 95]. Ґрунтоцементні елементи також

використовуються для армування ґрунтових основ на сейсмонебезпечній території [70, 71].

Аналізуючи зарубіжні дослідження застосування струменевої цементації в різних типах ґрунтів та вивчення ґрунтоцементного матеріалу (графіки міцності, графіки взаємозв'язку технологічних параметрів, графіки очікуваних діаметрів ґрунтоцементних колон в різних ґрунтових умовах, тощо), не можна сказати, що таку саму інформацію можна знайти в українських дослідженнях. В основному в вітчизняних наукових матеріалах можна зустріти міцнісні характеристики для ґрунту, що буз змішаний з цементним розчином, а не зруйнований високонапірним струменем з подальшим цементуванням. Що, в свою чергу, робить вивчення, аналізування та складання діапазонів застосування досліджуваної технології в умовах всіх типів ґрунтів в Україні актуальним.

## **1.2 Аналіз сучасного стану нормативної бази проєктування та застосування струменевої технології**

На території України нормативний документ, що регламентує струменево–цементаційні елементи, є *ДБН В.2.1–10.2009 "Основи та фундаменти. Зі змінами №1 та №2"*, згідно з яким одним з видів паль є ґрунтоцементні, що влаштовують у ґрунтовій основі шляхом перемішування ґрунту з водоцементною суспензією за струменевою або бурозмішувальною технологіями [16].

Згідно з приміткою 1 пункту 8.5.1.6 застосування ґрунтоцементних паль, які виготовляють за струменевою технологією, не допускається у просідаючих ґрунтах. В той же час згідно з п. 8.5.5.6: при проєктуванні пальових фундаментів у ґрунтових умовах, де просідання ґрунтів від власної ваги становить 30 см і більше, слід, як правило, передбачати заходи щодо зменшення величини просідання шляхом зрізання ґрунту або ущільнення попереднім замочуванням, замочуванням із вибухом, влаштуванням у

просідаючій товщі пальної основи фундаментів з ґрунтонабивних, ґрунтоцементних, піщано–вапняних паль чи іншими методами.

Також ґрунтоцементні пальові основи підходять при проектуванні фундаментів малоповерхових будівель та при реконструкції та підсиленні – п. 8.5.8.2 та п. 8.5.9.2.

На території Російської Федерації діє *СВОД ПРАВИЛ СП 291.1325800.2017 Конструкции ґрунтоцементные армированные. Правила проектирования* [43].

Означений документ [43] встановлює основні геотехнічні вимоги і поширюється на проектування армованих ґрунтоцементних конструкцій, які виконуються в ґрунті за методом струменевої цементації і глибинного перемішування при будівництві та реконструкції будівель і споруд.

Зводом Правил описуються етапи, які в процесі проектування ґрунтоцементних конструкцій мають бути включені.

Так само в Зводі Правил описані підходи до вибору проектної витрати цементу на м<sup>3</sup> обробленого ґрунту. Розглянуто розрахунок ґрунтоцементних конструкцій: ґрунтоцементних елементів, що згинаються, позацентрово навантажених армованих ґрунтоцементних елементів; описані особливості врахування ґрунтоцементних конструкцій при проведенні фільтраційних розрахунків і при гідрогеологічному прогнозі.

В свою чергу регламентований такий важливий момент, як дослідне випробування до початку робіт: "Роботи на дослідній ділянці можуть виконуватися в рамках досліджень або на етапі, що передує початку виконання робіт з влаштування ґрунтоцементного елемента". Мета дослідних робіт – визначення оптимальних параметрів технологічного процесу для забезпечення гарантованого діаметра елемента, не менше проектного, у всіх інженерно–геологічних елементах і досягнення проектних значень фізико–механічних характеристик одержуваного ґрунтоцементу.

На території Європи:

Франція: *Norme Francaise NF EN 12716 Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Jet-grouting – Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Colonnes, panneaux et structures de sol-ciment realises par jet*;

Великобританія: *British Standard BS EN 12716: 2001 Execution of special geotechnical works – Jet grouting* і т.д.

Всі ці норми є європейським стандартом *EN 12716*, розробленим *Committé Européende Normalisation [CEN]* (Європейський комітет зі стандартизації) [72].

В *EN 12716* наведений перелік дій, які повинні виконуватися при використанні в проєкті струменево-цементацийних елементів. Так само норми стверджують, що не тільки властивості струменево-цементацийного елемента (геометричні, механічні та/або гідравлічні) повинні бути визначені кількісно, але так само повинна бути вказана процедура отримання зразків і випробування їх. При відсутності можливості кількісного дослідження необхідно виконати польові випробування для доказу ефективності використання технології і перевірки технологічних параметрів.

Норми надають короткі загальні рекомендації з проєктування (розділ "Питання при проєктуванні") і більше спрямовані на процедуру виконання, проте визнають актуальність технологічних особливостей струменевої цементации для проєктних розрахунків.

Деякі європейські країни розробили свої національні стандарти з струменевої цементации. Наприклад, Німеччина – *DIN 4093–2015 Bemessung von verfestigten Bodenkörpern Hergestellt mit Düsenstrahl, oder Injektions–Verfahren* [69], Італія – *AGI 2012. Jet Grouting Guidelines: Associazione Geotecnica Italiana* [50]. Ці норми і рекомендації вказують на те, що шлях проєктування повинен бути організований у впорядкованій послідовності експериментальної діяльності та обробки даних, і пропонують деякі вказівки до найбільш важливих параметрів проєктування.

В Японії випущено нормативні документи – *Japanese Guidelines on Jet Grouting; JJGA 2005* (Японські рекомендації по струменевій цементации) [81].

Такі рекомендації охоплюють вказівки для проєктування, пропонуючи строгий детерміністський підхід. Процедура, запропонована в цих рекомендаціях, складається з наступних етапів:

1. Набір параметрів повинен бути спочатку визначений для характеристик ґрунту, що класифікуються як звичайні (глинисті і піщані) і особливі (піщано–гравійні та органічні). Серед всіх параметрів основну роль мають результати Стандартного Пенетраційного Тесту (Standard Penetration Tests (NSPT))
2. Прийнятність двох найбільш часто використовуваних методів в Японії, двокомпонентного зі спеціальним розчином (double–fluid jumbo special grout (JSG)) і трикомпонентного, визначається на основі типу ґрунту і значень NSPT.
3. Значення діаметра впливу (тобто діаметра колони) наведені для різних методів (JSG і струменева цементация) і ґрунтів (крупнозернистих і дрібних) в залежності від значення NSPT. Також наведені значення швидкості підйому ін'єкційної штанги і витрати розчину для отримання потрібного діаметра колони. При неоднорідності ґрунту необхідно вибрати найстабільніший шар.
4. Проєктні значення характеристик міцнісних властивостей (міцність на стиск, зчеплення, міцність на згин /розтяг і модуль Юнга) ґрунтоцементного матеріалу наведені на основі поєднання типу ґрунту і технології струменевої цементации.
5. Надано плани розташувань колон і товщини конструкцій для найбільш поширених випадків застосування – відсікаючи діафрагми, підсилення основи, проходження тунелів, заповнення міжпальових проміжків в утримуючих конструкціях.
6. Дано коефіцієнти безпеки для кожного типу застосувань, в залежності від того, чи тимчасова ця конструкція, чи постійна.
7. Наведено склад і дозування матеріалів (вода, цемент і хімічні добавки) для різних областей застосування.

При такому підході проєктування і виконання струменевої цементації формуються в дуже обмежену схему і навіть вибір геометрії розташування ґрунтоцементних елементів (сітка і відстань) знімаються з відповідальності проєктувальника.

Рекомендації з проєктування струменевої технології, видані в Сполучених Штатах Америки Американським товариством інженерів–будівельників (American Society of Civil Engineers) (*GI–ASCE 2009*) [51] є більш загальними і присвячені переважно визначенню ролі та кваліфікації операторів і регулювання відносин між клієнтом і підрядником, а не визначенню процедури проєктування. Що стосується проєктування, *GI–ASCE 2009* вказує на те, що "підрядник повинен нести відповідальність за вибір параметрів струменевої цементації, обладнання та конструкції елементів", тоді як "інженер відповідальний за загальний проєкт ґрунтоцементних елементів або ґрунтоцементної конструкції". Особлива увага приділяється процедурі контролю та забезпеченню якості з переліком операцій, які повинні виконуватись підрядником і завірятись замовником (наприклад, щодо типу і періодичності випробувань, критеріїв приймання).

На жаль, на території України відсутня нормативна база, яка б регламентувала порядок виконання струменево–цементацийних елементів, як європейські норми, описувала області застосування, як російські норми, та встановлювала порядок проєктування, як японські. В зв'язку з цим інженери–геотехніки часто стикаються з труднощами розуміння суті технології та особливостей її застосування при армуванні геотехнічних масивів.

Майже всі з описаних нормативних документів включають в себе пояснення основних технологічних параметрів струменевої цементації, та не один з них не дає залежностей цих параметрів від такої основної геометричної величини, як діаметр ґрунтоцементної колони, та типу ґрунту, залишаючи ці важливі аспекти на виконавця робіт.

### 1.3 Аналіз ефективності існуючих методик визначення технологічних параметрів струменевої цементації

Існуючі методики направлені на підбір оптимальних технологічних параметрів для виконання ґрунтоцементних елементів, виконаних за струменевою технологією. Основним параметром є геометричні характеристики отриманих елементів (наприклад, діаметр ґрунтоцементної колони, довжина панелі тощо). Розглянемо основні сучасні методики:

#### Методика визначення діаметра ґрунтоцементних колон в залежності від технологічних параметрів І. І. Бройда, Росія

Бройд І. І. розглянув особливість струменевого розмиву ґрунту при використанні струменевої цементації, при якій рух струменя з самого початку відбувається в ґрунтовому середовищі [3]. Руйнування ґрунту в процесі струменевого розмиву визначається багатьма факторами, такими як кавітаційний вплив струменя на ґрунт, дія динамічного тиску, ударний вплив на ґрунт водяних крапель роздробленого струменя, зменшення міцності ґрунту під впливом втомних напружень, що викликаються пульсуючим навантаженням, розмиваючого впливу високошвидкісного водяного струменя, а також фізичних і реологічних характеристик ґрунтів.

Радіус розмивної циліндричної ґрунтової порожнини  $R$  при однокомпонентній технології залежить від внутрішнього діаметра насадки  $d_c$ , тиску перед насадкою  $P$ , частоти обертання монітора  $n$ , швидкості підйому монітора  $V_{\text{под}}$ , щільності розчину  $\rho_{\text{р-ра}}$ , його водо–цементного співвідношення В/Ц, а також від характеристики розмиваємості ґрунту  $I_s$ :

$$R = f\left(d_c, P, n, V_{\text{под}}, \rho_{\text{р-ра}}, \frac{\text{В}}{\text{Ц}}, I_s\right) \quad (1.1)$$

Радіус розмиваючої дії струменя розчину:

$$R = 1052.5 \cdot \frac{d_c^{0.5}}{Re_{\text{стр}}^{0.5}} \left( \frac{30 \cdot \rho_{\text{р-ра}} \cdot g \cdot E_0}{\pi \cdot n \cdot I_s} \right)^{0.25} \frac{0.00826}{V_{\text{под}}^{0.75}}, \quad (1.2)$$



де  $Re_{\text{стр}}$  – число Рейнольдса для струменя розчину на виході з насадки,  $E_0$  – кінетична енергія на виході,  $n$  – пористість ґрунту.

Діаметр ґрунтоцементної колони:

$$D = 2R + d_{\text{мон}}, \quad (1.3)$$

де  $d_{\text{мон}}$  – діаметр монітора.

Витрати розчину:

$$Q_{\text{р-ра}} = V_{\text{стр}} \frac{\pi}{4} d_c^2 \quad (1.4)$$

Методика визначення складу обробленого ґрунту в струменево-цементацийній колоні, розроблена Малініним А. Г. (компанія "Інж Проект Строй", Росія)

Для розрахунку технологічних показників Малінін А. Г. розглянув застосовуваний на практиці циклічний режим влаштування ґрунтоцементної колони діаметром  $D$  (рис. 1.5), коли в кожному циклі відбувається підйом монітора на величину кроку  $S$ . Після обробки ґрунту протягом інтервалу часу  $T$  відбувається подальший підйом монітора на крок  $S$  і т. д. [33].

Прийmemo, що з монітора витікає струмінь цементного розчину з витратою  $Q_{\text{р-ра}}$ . Протягом одного циклу обробляється об'єм ґрунту  $V_k$ .

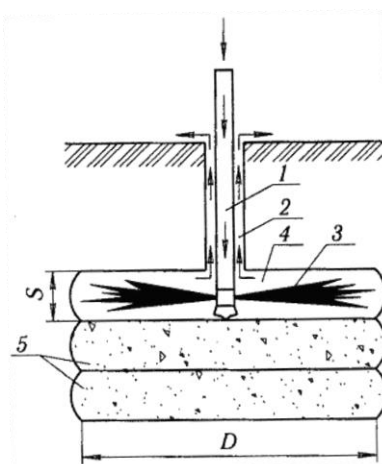


Рисунок 1.3 – Схема формування ґрунтоцементної колони: 1 – надходження цементного розчину, 2 – вихід пульпи, 3 – водоцементний струмінь, 4 – опрацьований об'єм ґрунту, 5 – ґрунт, оброблений в попередніх циклах [5]

Хоча процеси надходження розчину, перемішування з ґрунтом і виносу пульпи мають безперервний характер, для отримання розрахункових залежностей дискретизуємо процес, тобто розіб'ємо період циклу  $T$  на тимчасові інтервали  $\Delta t_1, \Delta t_2$  і т. д.:

$$T = \sum_{i=1}^k \Delta t_i \quad (1.5)$$

Протягом першого інтервалу часу  $\Delta t_1$  в ґрунт надходить водоцементний розчин об'ємом і масою, що визначається за формулами:

$$\Delta V_1 = Q_{p-pa} \cdot \Delta t_1 \quad (1.6)$$

$$m_{p-pa} = \rho_{p-pa} \cdot \Delta V_1$$

У масовому виразі надходження в ґрунт цементу і води:

$$m_{ц} = Q_{ц} \cdot \Delta t_1 \quad (1.7)$$

$$m_{в} = Q_{в} \cdot \Delta V_1,$$

де  $Q_{ц}$  витрати цементу і  $Q_{в}$  води.

Обсяг  $V_k$  містить ґрунт пористістю  $n$  з щільністю частинок  $\rho_s$ . Розглядаючи варіант обробки струменевою цементациєю обводненого ґрунту, можна визначити масу ґрунту і води, що містяться в обсязі  $V_k$ :

$$m_{gp} = (1 - n) \cdot \rho_s \cdot V_k \quad (1.8)$$

$$m_{в} = n \cdot \rho_{в} \cdot V_k$$

У масовому виразі в тілі колони залишиться ґрунт, цемент і вода:

$$m_{ц} = Q_{ц} \cdot \Delta t_1 \cdot \theta_1 \quad (1.9)$$

$$m_{gp} = (1 - n) \cdot \rho_s \cdot V_k \cdot \theta_1$$

$$m_{в} = (Q_{в} \cdot \Delta t_1 + n \cdot \rho_{в} \cdot V_k) \cdot \theta_1,$$

де  $\theta_1 = V_k / (V_k + \Delta V_1)$ .

Протягом другого інтервалу часу  $\Delta t_2$  новий цементний розчин об'ємом  $\Delta V_2 = Q_{p-pa} \cdot \Delta t_2$  надійде в тіло ґрунтоцементної колони.

Продовжуючи цю процедуру, можна розрахувати кількість цементу, ґрунту і води, що містяться в тілі ґрунтоцементної колони, в будь-який момент часу.

Методика визначення діаметра колони струменевої цементації, розроблена G. Modoni, P. Croce, L. Mongiovi, Університету Cassino і Trento, Італія

Спеціалісти G. Modoni, P. Croce з університету Cassino і, L. Mongiovi з університету Trento в Італії зробили спробу теоретичного моделювання механічного явища, спровокованого струменевим ін'єктуванням [90]. Беручи до уваги складність заплутаного механічного явища, розрахунки були обмежені однокомпонентною системою.

Вимірний процентний вміст вертикального потоку (пульпи), що складається з цементного розчину і деякої частини розмитого ґрунту збільшується зі зменшенням розміру ґрунтових частинок і варіюється між 0 і 80 % [83].

Для добре проникних ґрунтів, таких як крупнозернистий гравій, вертикальний потік стає несуттєвим і майже весь ін'єктований цементний розчин утримується ґрунтом. Фактично, в разі гравію (рис. 1.4 (а)), вся ін'єктована рідина може вільно просочуватися через пори ґрунту, відстежуючи приблизно радіальний шлях, без значних переміщень зерен ґрунту [61]. Це явище змодельовано як ефект фільтрації і важливою механічною властивістю є проникність ґрунту по відношенню до водоцементного розчину.

Для більш дрібних ґрунтів, таких як піски і глини, чий пори занадто малі, опір щодо просочування цементного розчину значно збільшується. Отже, струменевий потік прагне повернутися назад і перемістити частки, які можуть бути віддалені від їх початкового положення і по можливості захоплені до поверхні ґрунту. По суті це процес ерозії. Зокрема, передбачено два різних механізми ерозії для глин і пісків відповідно.

Для пісків (рис. 1.4 (б)) ін'єктована рідина приймається такою, що проникає в пори ґрунту протягом якоїсь певної відстані за лицьову поверхню ґрунту, таким чином викликаючи значне збільшення порового тиску і відповідно зменшення контактних зусиль між частинками. Явище змодельоване тривалим порівнянням дії струменя з опором зсуву ґрунту.

Для глинистих ґрунтів (рис. 1.4 (в)), чий пори надзвичайно малі, струмінь не може проникнути через фільтрацію в ґрунт. Дія струменя розглядається як прикладене навантаження на стіну ґрунту і пропорційно до механічного моменту (інерції, кінетичної енергії) струменя. Тоді цей ерозійний процес описується за допомогою ряду недренованих механізмів руйнування і недренована міцність  $c_u$  розглядається як основна властивість ґрунту. Схожий висновок отримано Даббаг і ін. [68] після виконання ряду лабораторних тестів ін'єкцій в глини.

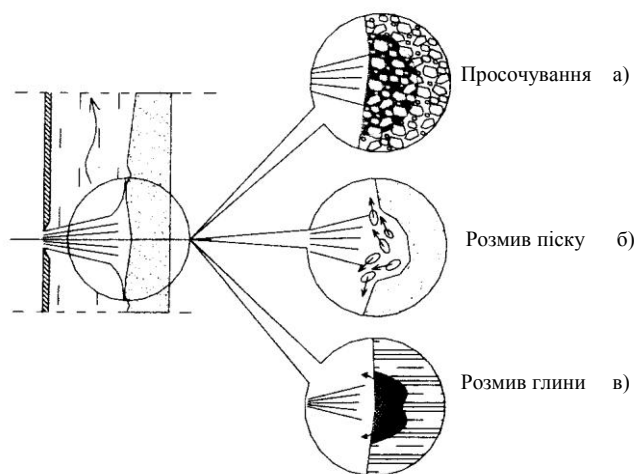


Рисунок 1.4 – Ескіз типів взаємодії між ґрунтом і цементним розчином

*Модель просочування (для гравелистих ґрунтів)*

Гранична відстань  $R_{\text{lim}}$  (радіус просочування):

$$R_{\text{lim}} = R_1 \cdot \exp \left[ \frac{k_f \cdot a_1}{R_1 \cdot q_0} \left( \Omega_g \frac{v_{eq-1}^2}{2g} - h_e \right) \right], \quad (1.10)$$

де відстань  $R$  від осі свердловини і індекс 1 стосуються поверхні свердловини,  $q_0$  – витрата розчину з сопла,  $a_1$  – площа поперечного перерізу струменя на стінці свердловини,  $k_f$  – проникність ґрунту для ін'єктованої рідини,  $\Omega_g$  – параметр, що враховує втрати енергії рідини, що нагнітається під час проходження кільцевого простору між ін'єкційними штангами і стінкою свердловини,  $v_{eq-1}$  – еквівалентна швидкість струменя, розрахована на стінці свердловини ( $R = R_1$ ).

Якщо  $R_e \leq R_{\text{lim}}$ , ін'єктована рідина повністю адсорбується в ґрунт і  $V_1$  продиктована умовою безперервності ( $V_1 = V_{1-q}$ ). Якщо  $R_e > R_{\text{lim}}$  ін'єктована рідина тільки частково поглинається ґрунтом і решта вимивається на поверхню через свердловину. У цьому другому випадку швидкість просочування на стінці свердловини продиктована умовою енергії ( $V_1 = V_{1-h}$ ).

### *Модель розмивання.*

Коли ін'єкційний струмінь впливає на ґрунт з проникністю нижчою, ніж у гравію, просочування розчину в значній мірі зустрічає перешкоду і потік розчину повертається, при цьому тягне ґрунт в сторону від його початкового положення. Цей механізм руйнування разом з заміщенням частинок ґрунту розчином, відповідальний за виконання ґрунтоцементної колонії.

Запропонована модель підходить і для визначення ефективності обробки. Вона визначається як співвідношення між обсягом розчину в колонії і обсягом заін'єктованого розчину і за умови однорідного складу ґрунтоцементу і пульпи і нульового обсягу повітря в ґрунтоцементі приблизно дорівнює:

$$E = \frac{1}{(1-n) + (m \cdot v_0 \cdot d_0^2 / v_s \cdot D_{av}^2)}, \quad (1.11)$$

де  $D_{av}$  – діаметр колонії,  $v_0$  – початкове значення швидкості на вісі,  $d_0$  – діаметр сопла,  $n$  – пористість ґрунту,  $m$  – кількість сопел.

Максимальний допустимий радіус колонії в піщаному ґрунті може бути отриманий прирівнюванням  $v_L$  і еквівалентної швидкості струменя:

$$R_{\text{max}} = \frac{2\Lambda \cdot v_{x0} \cdot c \cdot d_0}{\sqrt{\frac{\Omega_s g}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma_z \tan(\varphi')}{1 + \Omega_s [\tan(\varphi')/2]}}, \quad (1.12)$$

де  $\Omega_s$  ( $=\Omega_2/\Omega_1$ ) групує невідомі геометричні та механічні аспекти струменя і ґрунту,  $\Omega_1$  – безрозмірний параметр, розрахований для розсіювання енергії,  $\Omega_2$  – безрозмірний параметр, що відноситься до дії ґрунту, що чинить опір

струменю,  $c'$  и  $\varphi'$  – відповідно ефективне зчеплення і кут внутрішнього тертя ґрунту,  $\sigma_z$  – початкове вертикальне додаткове напруження.

Максимально допустимий радіус розмивання в глинистому ґрунті можна визначити як:

$$R_{\max} = \frac{2\Lambda \cdot v_{x0} \cdot c \cdot d_0}{\sqrt{\frac{\Omega_c g N c_u}{\gamma_f}}}, \quad (1.13)$$

де  $\Omega_c = \Omega_3 / \Omega_1$  – безрозмірний параметр, який повинен бути прийнятий на підставі експериментальних результатів,  $\Omega_3$  – безрозмірний параметр, який відноситься до міцності ґрунту  $c_u$ ,  $N$  – коефіцієнт турбулентної кінематичної в'язкості ін'єкційного струменя.

#### Розрахунок витрати розчину на основі коефіцієнта Канематцу

Витрата розчину в струмені є основним чинником, що визначає будівельні витрати. Однак ця кількість включає в себе частину розчину, що виходить разом з витісненим ґрунтом, тому раціональна оцінка витрат більш важка. У разі застосування різних методів струменевої цементації (одно-, дво- і трикомпонентної системи) необхідну кількість розчину визначають на основі емпіричної формули:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \lambda \cdot (1 + \beta), \quad (1.14)$$

де  $Q$  – необхідна кількість розчину,  $D$  – проєктний діаметр ґрунтоцементної колони,  $H$  – довжина колони,  $\lambda$  – експериментальний параметр, прийнятий за рисунком 1.5,  $\beta$  – коефіцієнт витрат (менше 0.1).

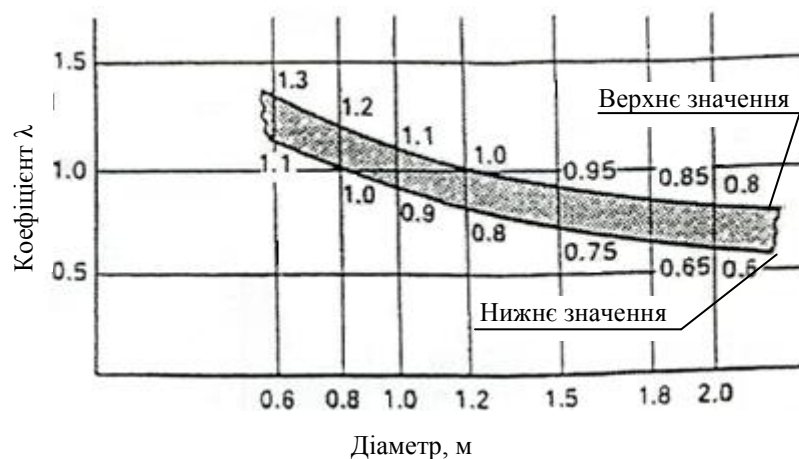


Рисунок 1.5 – Експериментальний коефіцієнт Канематцу ( $\lambda$ ) [82]

За результатами досліджень, проведених Covil C. S., Skinner A. E [60] і на основі роботи Канематцу були зроблені висновки, що близько 75% розрахункового обсягу розчину потрібно для руйнування ґрунту і формування колони струменевої цементації. У разі піщаних і гравійних ґрунтів ця цифра становитиме від 50% до 60%, в той час як в глинах та інших, більш зв'язних породах, становить до 120% від розрахункового об'єму колони.

Метод визначення складу ґрунтоцементного матеріалу, розроблений Kauschinger L. Joseph

Kauschinger L. Joseph з ASCE<sup>1</sup> в своїй роботі [84] описав метод визначення складу ґрунтоцементу колон, виконаних за технологією струменевої цементації, ґрунтуючись на принципі збереження маси:

- цемент в колоні  $m_{ц.к}$  = заін'єктований цемент – цемент, винесений в пульпі;
- вода в колоні  $m_{в.к}$  = вода (в ґрунті + заін'єктована) – вода, винесена в пульпі;
- ґрунт в колоні  $m_{гр.к}$  = ґрунт, оброблений струменем – ґрунт, винесений в пульпі.

Загальна об'ємна вага матеріалу в колоні,  $\gamma_{к.заг}$ , визначається як

<sup>1</sup>American Society of Civil Engineers

$$\gamma_{\text{к.заг}} = \frac{m_{\text{к.заг}}}{V_{\text{к}}}, \quad (1.15)$$

де  $m_{\text{к.заг}}$  – загальна вага сегмента колони,  $V_{\text{к}}$  – об'єм сегмента колони.

Об'єм циліндричної колони:

$$V_{\text{к}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2 \cdot \Delta z, \quad (1.16)$$

де  $\Delta z$  – висота циліндричного елементу ґрунтоцементної колони,  $D$  – діаметр колони.

Загальна маса колони:

$$m_{\text{к.заг}} = m_{\text{ц.к}} + m_{\text{в.к}} + m_{\text{гр.к}} + m_{\text{пов.к}}, \quad (1.17)$$

де  $m_{\text{к.пов}}$  – маса повітря в колоні, яка ігнорується.

Відповідно діаметр ґрунтоцементної колони:

$$D = \sqrt{\frac{m_{\text{к.заг}}}{\frac{\pi}{4} \cdot \Delta z \cdot \gamma_{\text{к.заг}}}} \quad (1.18)$$

Співвідношення ґрунту в пульпі до води в пульпі, що виноситься з свердловини під час обробки ґрунту струменем розраховується наступним чином:

$$\frac{m_{\text{гр.п}}}{m_{\text{в.п}}} = \left(\frac{\Gamma}{B}\right)_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \left[ \frac{1}{\rho_{\text{в}}} + \frac{1}{\rho_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{ц}}} \cdot \left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}} \right] - \left[ 1 + \left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}} \right]}{\left[ 1 - \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{гр}}} \right]}, \quad (1.19)$$

де  $\rho_{\text{п}}$  – щільність пульпи,

$\rho_{\text{гр}}$  – об'ємна вага ґрунту.

Співвідношення  $\left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}}$  - це співвідношення цементу і води, що містяться в пульпі. Вага цементу, ґрунту і води, що виносяться з пульпою можуть бути розраховані використовуючи наступні рівняння:

$$m_{\text{гр.п}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \frac{\left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}}}{\left(\frac{\Gamma}{B}\right)_{\text{п}}} + \frac{1}{\left(\frac{\Gamma}{B}\right)_{\text{п}}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.20)$$

$$m_{\text{ц.п}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \frac{\left(\frac{\Gamma}{B}\right)_{\text{п}}}{\left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}}} + \frac{1}{\left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п-пы}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.21)$$

$$m_{\text{в.п}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \left(\frac{\Pi}{B}\right)_{\text{п}} + \left(\frac{\Gamma}{B}\right)_{\text{п}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.22)$$



де  $Q_{\text{п}}$  – витрати пульпи,

$\frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}$  – вираз, що представляє обсяг пульпи,

$\frac{\Delta z}{V_{\text{під}}}$  – вираз, що показує час, витрачений на розмив ґрунту.

Наступні співвідношення виведені для визначення ваги ґрунту, води і цементу, що знаходиться в струменево-цементацийній колоні; остаточний вираз для діаметра  $D$  – функція  $m_{\text{к.заг}}$  (рівняння (1.18)), в якому в свою чергу є  $D$ , як невідома величина, а інші параметри можуть бути виміряні. Представлений комплекс рівнянь має наступний вигляд:

$$m_{\text{гр.к}} = \left( \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \Delta z \right) \cdot \left( \frac{\rho_{\text{гр}}}{1+W} \right) - \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \frac{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} + \frac{1}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.23)$$

$$m_{\text{ц.к}} = \left[ \frac{\rho_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{в}}}{1 + \rho_{\text{ц}} \cdot \left( \frac{B}{\Gamma} \right)_{\text{р}}} \right] \cdot \left[ \frac{Q_{\text{р}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}} \right] - \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \frac{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} + \frac{1}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.24)$$

$$m_{\text{в.к}} = \left( \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \Delta z \right) \cdot \left( \frac{\rho_{\text{гр}}}{1+W} \right) - \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\left[ 1 + \frac{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} + \frac{1}{\left( \frac{\Gamma}{B} \right)_{\text{п}}} \right]} \cdot \frac{Q_{\text{п}} \cdot \Delta z}{V_{\text{під}}}, \quad (1.25)$$

де  $Q_{\text{р}}$  – витрати розчину,

$\left( \frac{B}{\Gamma} \right)_{\text{р}}$  – водо-цементне співвідношення розчину.

### Залежність діаметра колони від міцності, запропонована компанією Ischebeck, Німеччина

Спеціалісти компанії Ischebeck запропонували емпіричну залежність діаметра колони струменевої цементациї від тиску нагнітання, швидкості підйому монітора і витрати розчину:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P \cdot Q_{\text{р-ра}}}{B \cdot V_{\text{под}}}}, \quad (1.26)$$

де  $P$  – тиск нагнітання, МПа,  $Q_{\text{р-ра}}$  – витрата розчину, м<sup>3</sup>/с,  $V_{\text{под}}$  – швидкість підйому монітору, м/с,  $A$  і  $B$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу ґрунтів.

Відповідно до дослідної практики – чим вище міцнісні властивості ґрунту, тим менше ґрунт розмивається струменем цементного розчину. Фахівці компанії "ІнжПроектСтрой", м. Пермь, Малінін А. Г. і Гладков І. Л. на підставі експериментальних даних визначили коефіцієнти А і В у залежності від зчеплення ґрунту [36]:

$$A(c) = 5.7 \cdot c^{-0.25} \quad (1.27)$$

$$B(c) = 11.2 \cdot c^{0.4} \quad (1.28)$$

Підставивши значення параметрів А і В з рівнянь (1.27) і (1.28) в рівняння (1.38), отримаємо остаточний вираз діаметра колони струменевої цементації від технологічних параметрів і величини зчеплення оброблюваного ґрунту:

$$D = \sqrt[5.7 \cdot c^{-0.25}]{\frac{P \cdot Q_{p-ра}}{11.2 \cdot c^{0.4} \cdot V_{под}}} \quad (1.29)$$

Порівнюючи розглянуті методики розрахунку технологічних та геометричних параметрів ґрунтоцементних елементів, що виконані за струменевою технологією, можна зробити наступні висновки:

- методика російського вченого І. І. Бройда дозволяє розрахувати діаметр ґрунтоцементної колони з використанням таких основних параметрів, як тиск, витрати та швидкість струменя цементного розчину, але також включає в себе такий параметр, як характеристика руйнації ґрунту, який можливо отримати тільки експериментальним шляхом;
- Малінін А. Г. в своїх роботах наводить алгоритм розрахунку витрат цементу на погонний метр ґрунтоцементної колони, що є важливим економічним фактором робіт, але залишає діаметр колони величиною відомою для використання її в розрахунках. Тобто ще до початку робіт, враховуючи інженерні умови ділянки, виконавчач повинен самостійно обрати технологічні параметри обладнання, що, в свою чергу, неможливо без напрацювання об'ємної практичної бази;

- найбільш детальний розрахунок проектного діаметру ґрунтоцементної колони представлений італійськими вченими G. Modoni, P. Croce. Розрахункові діаметри можна отримати не тільки в залежності від технологічних параметрів, але й від типу ґрунту, але також в розрахунках використані параметри, які необхідно отримати тільки на підставі експериментальних результатів;
- параметр Канематцу дозволить визначити витрати розчину при виконанні струменево-ін'єкційних робіт, але також залишає питання розрахунку діаметра відкритим;
- метод, розроблений Kauschinger L. Joseph, дає можливість розрахувати діаметр, але при чіткому врахуванні кількості цементу, ґрунту і води, що будуть в пульпі, тобто в частині відпрацьованого розчину, винесеного на поверхню. В умовах будівельного майданчика при об'ємних роботах такий контроль є надскладним;
- німецька компанія Ischebeck використовує в своїх розрахунках діаметру колони емпіричні параметри, що залежать від типу ґрунтів. Російські вчені, в свою чергу, на підставі експериментальних досліджень вивели залежності цих параметрів для ґрунтових умов території Росії. Але при використанні емпіричних параметрів для будівельних об'єктів в ґрунтових умовах України, отримані результати не відповідають дійсності.

### **Висновки за розділом 1**

Аналіз попередніх досліджень технології струменевої цементації показав, що не дивлячись на те, що технологія впроваджується з 70-х років минулого століття, є ще багато питань, які мають бути дослідженими: зв'язок технологічних параметрів з параметрами ґрунтоцементного елементу, вплив на оточуюче ґрунтове середовище, тощо.

Проаналізувавши сучасний стан нормативної бази, яка стосується проєктування та виконання ґрунтоцементних елементів за струменевою

технологією, було відмічено, що на сьогоднішній день в Україні практично відсутні нормативні документи, які визначають порядок розрахунку, проєктування та виконання струменево–цементацийних елементів.

Більшість сучасних українських досліджень ґрунтоцементу спрямована на бурозмішувальні технології, в яких розглянуті і широкий діапазон ґрунтів, і чисельні значення міцності отриманого матеріалу. Але використовувати ці значення міцності для елементів, що виконуються за струменевою технологією є помилкою, бо при бурозмішувальній технології ґрунтоцемент – це продукт механічного перемішування, іноді з великими ґрунтовими включеннями, а при ін'єкційній технології – ґрунтоцемент утворюється руйнуванням та перемішуванням високонапірним струменем, формуючи більш однорідний матеріал. В іноземній технічній літературі в більшості випадків на графіках міцнісних характеристик ґрунтоцементу зустрічаються типи ґрунтів, що не розповсюджені в Україні. Тобто при виконанні проєкту з застосуванням струменево–цементацийних елементів на території нашої країни в більшості випадків неможливо знайти значення очікуваних характеристик ґрунтоцементного матеріалу, що формує завдання аналізу та впорядкування багатьох чисельних експериментальних значень характеристик матеріалу елементів, що виконані за струменевою технологією, в таких основних типах ґрунтів, як піски, супіски, суглинки.

Існуючі методики розрахунків ґрунтоцементних елементів переважно направлені на отримання таких даних, як витрати цементного розчину під час виконання струменево–цементацийних елементів будь–якої конфігурації. І тільки деякі автори пропонують розрахунок радіусу розмиваючого струменя, але ці методики та підходи базуються на багатьох експериментальних параметрах, які автори пропонують отримувати на будівельних майданчиках під час роботи. Тобто для інженерів–проєктувальників, що не мають змоги виконати ряд експериментальних досліджень, застосування цих методик неможливе. В зв'язку з цим необхідною є розробка методу розрахунку геометричних параметрів ґрунтоцементного елементу та адаптування його до

українських ґрунтових умов, що дозволить його проєктування без безпосереднього доступу до будівельного майданчика.

Базуючись на факті відсутності досліджень впливу виконання струменево–цементацийних елементів на оточуюче ґрунтове середовище та зіставленні даного факту з отриманими дослідними результатами в процесі робіт з підсилення ґрунтової основи існуючих будівель, постало завдання з дослідження фізико–механічних властивостей ґрунтів, що оточують ґрунтоцементні елементи з подальшим використанням отриманих значень в моделюванні підсилення будівель.

При аналізі літературних даних стосовно ґрунтових умов, в яких виконуються ґрунтоцементні елементи, було відмічено про відсутність прикладів застосування струменево–цементацийних колон при підсиленні ґрунтових основ будівель при наявності складних інженерно–геологічних умов, наприклад, напівскельні ґрунти. Це поставило завдання вивчення можливості застосування ґрунтоцементних колон для підсилення основ фундаментів в умовах напівскельних прошарків ґрунту, в яких виконання колон є проблематичним.

## РОЗДІЛ 2

### ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕВОГО ІН'ЄКТУВАННЯ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОТРИМАНИХ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

#### 2.1 Основні технологічні параметри та характеристики грунтоцементного матеріалу

До початку аналізу експериментальних даних необхідно зупинитися на основних відомостях про технологічні параметри струменевої технології та деяких літературних даних щодо характеристик грунтоцементного матеріалу для подальшого аналізу та порівняння з результатами дослідів, отриманими в даній роботі. Обробка ґрунту високонапірним струменем цементного розчину при створенні струменево–цементацийних елементів виконується шляхом регулювання і контролю набору технічних параметрів, які можна назвати "основними струменево–цементацийними параметрами" (табл. 2.1) [62]:

- геометричні характеристики обладнання;
- кінематичні змінні, що визначають рух струменя;
- склад, тиск і витрати ін'єктованої рідини.

Таблиця 2.1 – Основні параметри обробки при струменевій цементації

<i>Параметр</i>	<i>Призначення</i>	<i>Символ<sup>2</sup></i>	<i>Один. виміру</i>
Геометричні	Кількість сопел	$M$	–
	Діаметр сопла	$d$	м
	Крок підйому	$\Delta s$	м
Кінематичні	Час на крок	$\Delta t$	с
	Швидкість обертання	$\omega$	рад/с
	Співвідношення В/Ц	$W/C$	–
Рідини, що ін'єктуються	Тиск рідин	$p_g, p_w, p_a$ ( <i>grout, water, air</i> )	МПа
	Витрати рідин	$Q_g, Q_w, Q_a$	м <sup>3</sup> /с

<sup>2</sup> Позначення символів технологічних параметрів наведені відповідно до описаних символів в книзі Jet grouting: Technology, design and control, Croce P, Flora A. [62]

Очевидно, що кожна система струменевої цементації (однокомпонентна, двокомпонентна і трикомпонентна) матиме різний набір параметрів залежно від ін'єктованої рідини. Деякі параметри (наприклад, тиск розчину, діаметр сопла і швидкість потоку) не можуть бути обрані незалежно один від одного, оскільки вони взаємопов'язані.

Всі параметри в струменево–цементацийному процесі пов'язані між собою. І всі параметри, в тій чи іншій мірі, беруть участь в реалізації емпіричних і числових методів оцінки діаметра ґрунтоцементного елемента.

Надалі в роботі буде розглянута тільки однокомпонентна технологія.

#### *Швидкість обертання монітору і крок підйому.*

Процес підняття монітору може виконуватися плавно, але краще здійснювати його кроками: у глинистих ґрунтах висота кроку повинна бути малою (близько 2 см), в той час як в піщаних і гравійних ґрунтах монітор можна піднімати з великим кроком (близько 4 см або в рідкісних випадках більше) [59]. Отже, відповідно до обраних швидкості підняття монітора і висоти кроку, струмінь (або струмені, при декількох соплах) виконує кілька обертів на одній і тій же висоті відповідно до швидкості обертання.

Швидкість підйому монітора є одним з факторів, що впливає не тільки на діаметр одержуваної колони струменевої цементації, а й на такий технологічний процес, як вихід пульпи. При занадто швидкому піднятті монітора має місце ризик ефекту "штопора", при занадто повільному піднятті – з'являються проблеми з підйомом пульпи до поверхні ґрунту і, як наслідок, закупорка кільцевого простору між свердловиною і бурової штангою.

#### *Потужність, тиск і витрати розчину.*

Згідно з Бернуллі [48], тиск рідини струменя (розчину, води, в випадку попереднього розмиву) на виході з циліндричної частини сопла монітора розраховується як:

$$P_{стр} = 0.5\rho_p \cdot V_{стр}^2, \quad (2.1)$$

де  $\rho_p$  – щільність розчину и  $V_{cmp}$  – швидкість струменя рідини в циліндричній частині сопла.

Швидкість струменя в циліндричній частині сопла розраховується як [48]:

$$V_{cmp} = Q_p / \left( \frac{\pi d_c^2}{4} \right), \quad (2.2)$$

де  $Q_p$  – витрати рідини, що подається через сопло діаметром  $d_c$ .

Виходячи з цього, діаметр сопла управляє співвідношенням між тиском і витратою струменя, тобто потужністю струменя.

Отже, можна розрахувати діаметр сопла на гідромоніторі для того, щоб отримати тиск і необхідні витрати струменя, беручи до уваги щільність використовуваного розчину.

Тиск струменя (на виході з сопла) нижче, ніж фактичний тиск на виході з насоса, внаслідок того, що він зазнає втрати через тертя, якому піддається розчин протягом усього руху між насосом і монітором (ці втрати можуть досягати більше 100 бар). Втрати тиску залежать від:

- витрат розчину нагнітання;
- щільності розчину: струмінь води (на прикладі попереднього розмиву) зазнає втрат менше ніж струмінь розчину;
- довжини і діаметру гнучких шлангів, що з'єднують насос з буровими штангами;
- глибини буріння і внутрішнього діаметра бурових штанг.

### *Енергія струменя*

Одним з важливих параметрів поряд зі швидкістю струменя розчину, яка обробляє ґрунт, і часом прикладання струменя на одну і ту ж поверхню, є руйнівна енергія.

Кінетична енергія струменя [48]:

$$E_{cmp} = 0.5mV^2, \quad (2.3)$$

де  $m$  – маса рідини, що подається в одиницю часу.



За допомогою інтегрування отримуємо:

$$E_{cmp} = P_{cmp} \cdot Q_p \cdot t_{n\dot{o}}, \quad (2.4)$$

де  $P_{cmp} \cdot Q_p$  – потужність струменя на виході із сопла і  $t_{n\dot{o}}$  – час прикладання струменя (або час підйому). Або

$$E_{cmp} = \frac{P_{cmp} \cdot Q_p}{V_{n\dot{o}}}, \quad (2.5)$$

де  $V_{n\dot{o}}$  – швидкість обертання монітору (або швидкість підйому бурових штанг).

Також енергію струменя можна використовувати для введення параметра, який кількісно визначає ефективність обробки ґрунту з точки зору технічної та економічної зручності.

Параметр ефективності визначається як співвідношення між отриманим прибутком (тобто об'єм одиниці довжини колони  $V_c$ , виражений в кубічних метрах на метр ( $\text{м}^3/\text{м}$ ), що співпадає з поперечним перерізом колони) і параметром, що представляє вартість одиниці роботи, який може бути питомою кінетичною енергією обробки ґрунту ( $E'$  в МДж) [62]. В якості альтернативи  $E'$  можна розглядати об'єм закачаного розчину  $V_g$  на одиницю довжини колони, виражений в кубічних метрах на метр ( $\text{м}^3/\text{м}$ ).

Енергетична ефективність:

$$\lambda_E = \frac{V_c}{E'} \quad (2.6)$$

Об'ємна ефективність:

$$\lambda_V = \frac{V_c}{E_g} \quad (2.7)$$

Зворотна величина  $(1/\lambda_E)$  енергетичної ефективності називається "об'ємна питома енергія"  $E'_s$  і часто розглядається на практиці [103].

З урахуванням питомої енергії на насосі два параметри ефективності пов'язані наступним чином:

$$\lambda_E = \frac{1}{p} \lambda_V \quad (2.8)$$

Високі значення ефективності означають, що певний діаметр ґрунтоцементної колони можна отримати з меншими витратами енергії або з меншою кількістю цементного розчину.

Підсумовуючи, можна сказати, що для установки параметрів струменевого ін'єктування, перший етап – це оцінка енергії струменя, необхідної для отримання проєктного діаметру струменево–цементацийної колони в відповідних ґрунтових умовах з вибраною системою струменевого ін'єктування і вибраними матеріалами.

Наступним етапом в процесі дослідження постануть залежності очікуваного діаметру від таких технологічних параметрів, як тиск нагнітання, та основна залежність діаметр – тип ґрунту, в якому виконується ґрунтоцементний елемент.

#### *Діаметр струменево–цементацийної колони*

Необхідне значення середнього діаметра колон може бути вибрано за допомогою відповідної системи струменевої цементациї залежно від типу оброблюваних ґрунтів і належного вибору параметрів обробки (кількість і діаметр насадок, тиск струменя і витрати розчину, швидкість підйому гідромонітору і склад розчину).

На практиці в більшості випадків цей вибір заснований на попередньому досвіді, і вибір параметрів здійснюється емпірично з використанням результатів польових випробувань.

У розділі 1 були розглянуті деякі підходи авторів до визначення проєктного діаметра і деяких параметрів, таких, як витрати цементного розчину. В подальшій роботі розглянуті підходи використовуватися не будуть.

Багато авторів приводять діаметри, що будуть отримані, в різних типах ґрунту у вигляді таблиць. Таким прикладом є очікувані діаметри (табл. 2.2), описані в Нормах, що діють на території Італії – Jet Grouting Guidelines: Associazione Geotecnica Italiana [50].

Таблиця 2.2 – Значення діаметрів струменево–цементацийних колон

Тип струменевої цементації	Діаметр колон, м			
	Помірно щільна глина	М'який мул і глина	Замулений пісок	Пісок і/або гравій
Однокомпонентна система	Не рекомендується	0,4–0,8	0,6–1,0	0,6–1,2
Двохкомпонентна система	0,5–1,0	0,6–1,3	1,0–2,0	1,2–2,5
Трикомпонентна система	0,8–1,5	1,0–1,8	1,2–2,5	1,5–3,0

Наступною основною характеристикою грунтоцементного елементу є його міцність, що є одним з найважливіших параметрів при армуванні грунтового масиву струменево–цементацийними елементами.

#### Міцність грунтоцементного матеріалу

Міцність грунтоцементного матеріалу в першу чергу залежить від типу струменевої цементації (однокомпонентна, двокомпонентна або трикомпонентна), від типу оброблюваного ґрунту і часу, витраченого на обробку, від водоцементного співвідношення цементного розчину і від кількості цементу на 1 м п. колони.

В якості першого визначального фактора розглянемо витрату цементу на одиницю об'єму колони в різного типу ґрунту:

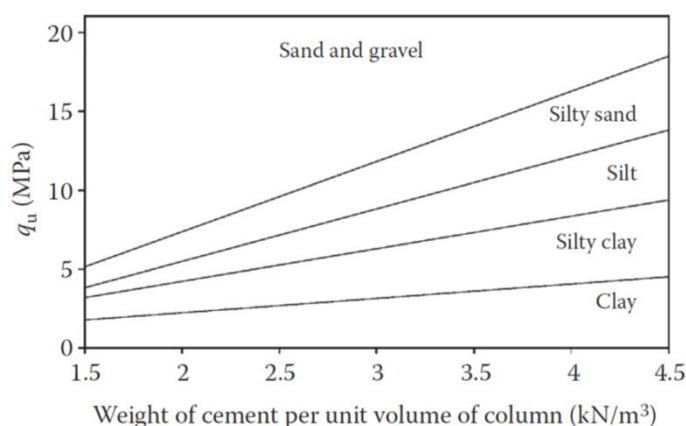


Рисунок 2.1 – Орієнтовні діапазони міцності на стиск для різних типів ґрунтів і різної кількості ін'єктованого цементу [62]

На графіку рисунка 2.1 показано високі значення міцності на стиск в крупнозернистих ґрунтах (приклад – ґрунтоцементний матеріал з колони, що виконана в гальково–щебенистих ґрунтах – рис. 2.2, а), а для глинистих і мулистих ґрунтів більш низькі значення, що може бути також обумовлено наявністю грудок незцементованого матеріалу (рис. 2.2, б).

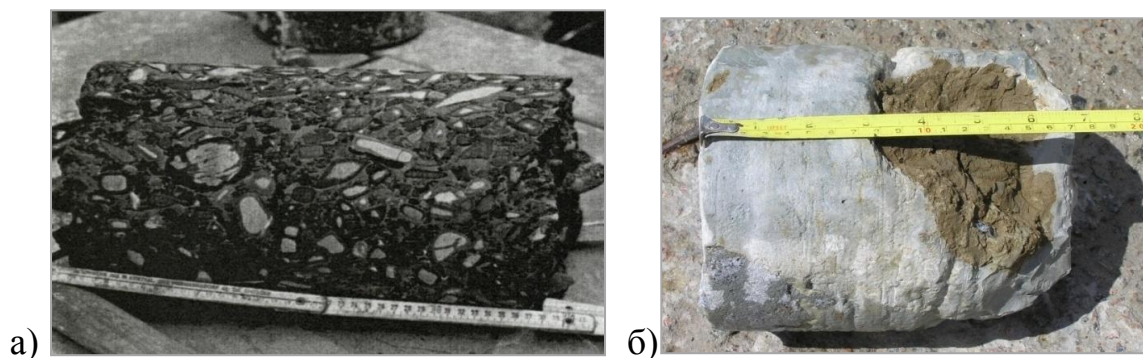


Рисунок 2.2 – Ґрунтоцементний матеріал, отриманий в різних ґрунтових умовах: а) гальково–щебенистий ґрунт, б) глинистий ґрунт

Італійська компанія Compagnia Consolidamenti e Pali в своїх матеріалах також вважає за краще користуватися залежністю "міцність на стиск – тип ґрунту", включаючи в цю залежність таку змінну, як діаметр (рис. 2.3).

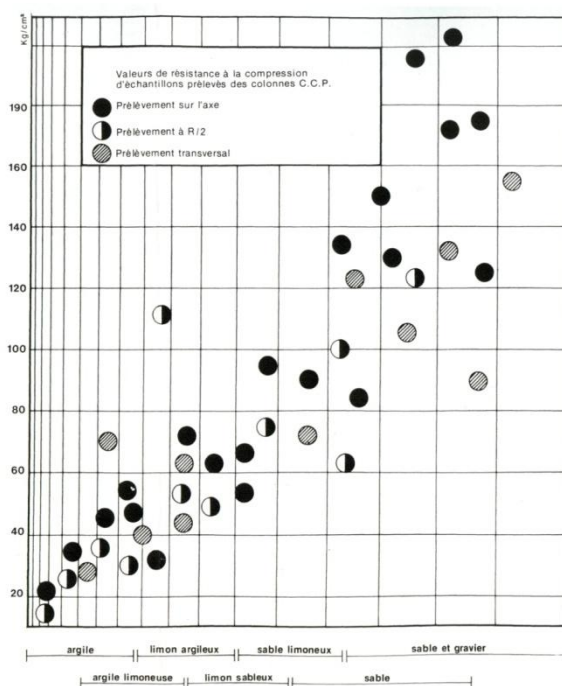


Рисунок 2.3 – Залежність міцності зразків, взятих з тіла колони струменевого ін'єктування в залежності від типу ґрунту [38]

В дисертаційній роботі неодноразово наголошується, що міцність на стиск ґрунтоцементу змінюється залежно від типу ґрунту. За даними різних дослідників [100] діапазони міцності на стиск для різних типів ґрунтів представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Міцність на стиск ґрунтоцементу

<i>Тип ґрунту</i>	<i>Міцність на стиск ґрунтоцементу, МПа</i>						
	<i>Miki (1985)</i>	<i>Bell (1993)</i>	<i>Fang et al. (1994)</i>	<i>Melegari &amp; Garassino (1997)</i>	<i>Stoel &amp; Ree (2000)</i>	<i>Shibazaki (2003)</i>	<i>Ökmen (2004)</i>
Глина	<5	0,5–8	2–10	1,8–3	3–14	10	1–5
Мул		4–18		3–4,5			
Пісок	5–10	5–25	5–21	6–9	3–33	30	5–23
Гравій		5–30		10			

Короткий огляд діапазонів характеристик ґрунтоцементного матеріалу з різних літературних джерел дозволить в подальшому порівняти отримані результати експериментальних досліджень (Розділ 3), а вже існуючі взаємозалежності технологічних параметрів дадуть можливість побудувати алгоритм розрахунку робочих параметрів та прогнозування очікуваного розміру ґрунтоцементного елемента на основі проведеного в даній роботі аналізу експериментальних результатів.

## **2.2 Експериментальні результати дослідження залежності між діаметром струменево–цементацийної колони і технологічними параметрами**

Аналіз впливу технологічних параметрів і типу ґрунту на діаметр ґрунтоцементних колон, розглянутий в даному розділі, заснований на практичних даних, отриманих на більш ніж 30–ти будівельних об'єктах, виконаних компанією Soletanche Bashy (Le Louvre<sup>3</sup> – Франція, Cervia – Італія, Geneve LAC – Швейцарія, Geneve Croix d'or – Швейцарія, Promedio – Італія,

<sup>3</sup> тут і далі приведені назви об'єктів мовою оригіналу та країну, в якій були виконані роботи

Meissies – Франція, Allegneny Jail (Pitsburg) – США, Puerto Acautla – Сальвадор і ін.). На всіх перерахованих об'єктах була застосована однокомпонентна струменева технологія.

Відповідно до поставлених в дисертаційній роботі завдань для вивчення ефективних залежностей між діаметром колони і технологічними параметрами дослідні дані були, в першу чергу, розділені за типом ґрунтів – незв'язні і зв'язні: піски і гравій, супісок і суглинок. Наступним етапом були виділені: тиск струменя цементного розчину, витрати цементного розчину, швидкість підйому робочого інструмента і енергія струменя.

Всі залежності побудовані як функції отриманого діаметру ґрунтоцементної колони, як основного досліджуваного геометричного параметру.

#### Тиск цементного струменя – Діаметр

На рисунках 2.4 і 2.5 наведені залежності діаметра ґрунтоцементної колони від тиску струменя цементного розчину. Оскільки тиск струменя важливий, але не єдиний технологічний параметр, який впливає на формування колони, на графіках показані усереднені границі застосованого тиску для того чи іншого діаметру в різних типах ґрунту

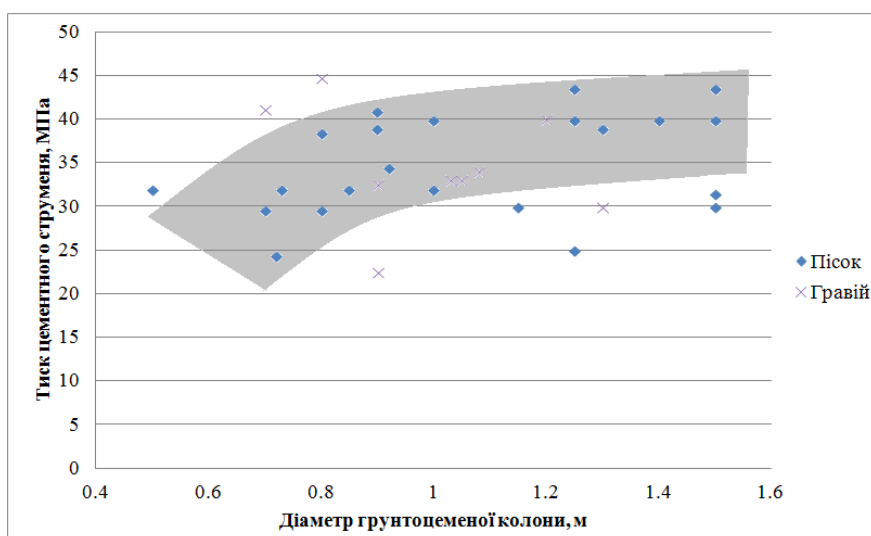


Рисунок 2.4 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від тиску струменя в незв'язних ґрунтах (пісок, гравій)

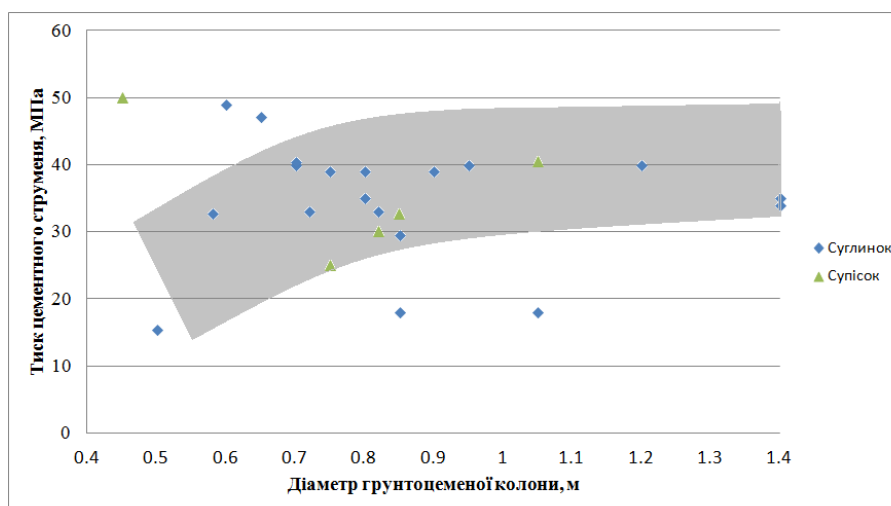


Рисунок 2.5 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від тиску струменя в зв'язних ґрунтах (супісок, суглинок)

Аналізуючи дані на графіках (рис. 2.4 і 2.5) можна зробити наступні висновки:

- для однакових діапазонів тиску струменя (наприклад, 35–45 МПа) діаметри для незв'язних ґрунтів перевищують діаметри колон в зв'язних ґрунтах (1,2–1,4 м в порівнянні з 0,7–1,0 м), що пов'язано з великим опором зв'язного ґрунту до руйнування його структури високонапірним струменем цементного розчину,
- якщо для незв'язного ґрунту діапазон діаметра колон варіюється від 0,6 до 1,5 м, то для зв'язного – від 0,5 до 1,1 м, більш великі діаметри виконуються зі зменшенням таких технологічних параметрів, як швидкість обробки ґрунту,
- область робочих параметрів тиску струменя для однокомпонентної струменевої технології для незв'язних ґрунтів – 25–45 МПа, для зв'язних ґрунтів – 30–50 МПа.

#### Витрати цементного розчину – Діаметр

Витрата цементного розчину на погонний метр колони є одним з економічних показників, оскільки при перевитраті цементу для досягнення

проектних геометричних параметрів ґрунтоцементної колони струменева цементация втрачає свою економічну доцільність.

На рисунках 2.6 і 2.7 наведені залежності діаметра ґрунтоцементної колони від витрати цементного розчину.

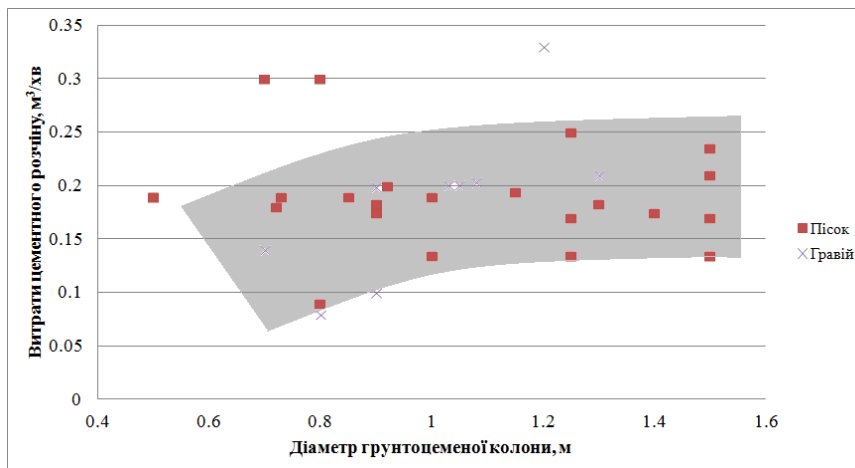


Рисунок 2.6 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від витрат цементного розчину в незв'язних ґрунтах (пісок, гравій)

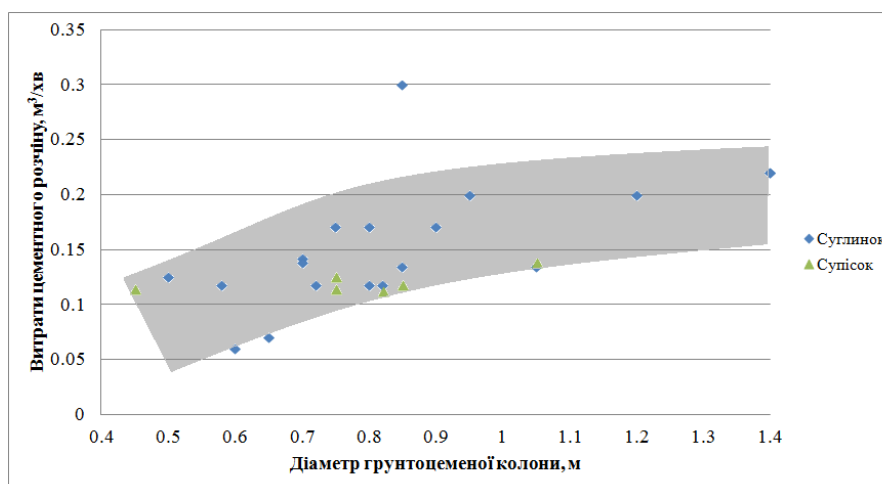


Рисунок 2.7 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від витрат цементного розчину в зв'язних ґрунтах (супісок, суглинок)

Порівнюючи побудовані області зміни витрат цементного розчину в залежності від діаметра, можна зробити такі висновки:

– діапазон зміни витрати цементного розчину для незв'язних ґрунтів –  $0,13\text{--}0,25 \text{ м}^3/\text{хв}$  для діаметра колони  $0,7\text{--}1,5 \text{ м}$ , для зв'язних ґрунтів –  $0,7\text{--}2,0 \text{ м}^3/\text{хв}$  для діаметра  $0,6\text{--}1,0 \text{ м}$ .



– витрати цементного розчину і швидкість підйому інструменту безпосередньо впливають на міцність ґрунтоцементного матеріалу.

Описана залежність, як і попередня і подальші, показує, що для однокомпонентної технології діаметри виконаних ґрунтоцементних колон в незв'язних ґрунтах перевищують максимальний діаметр в зв'язних в 1,5 рази.

### Швидкість підйому інструмента – Діаметр

Швидкість підйому монітора є одним з факторів, що впливають не тільки на діаметр одержуваної колони струменевої цементації, а й на міцність ґрунтоцементного матеріалу (рис. 2.8, 2.9).

При неправильному виборі швидкості, наприклад, занадто великої для певного типу ґрунту, не тільки не буде створена колона заданих геометричних параметрів, але й в ґрунтоцементному матеріалі залишиться великий відсоток не перемішаного ґрунту (рис. 2.2, б), який в свою чергу знизить значення міцності матеріалу на стиск.

На рис. 2.8 і 2.9 побудовані залежності діаметра струменево-цементацийної колони від швидкості підняття інструменту.

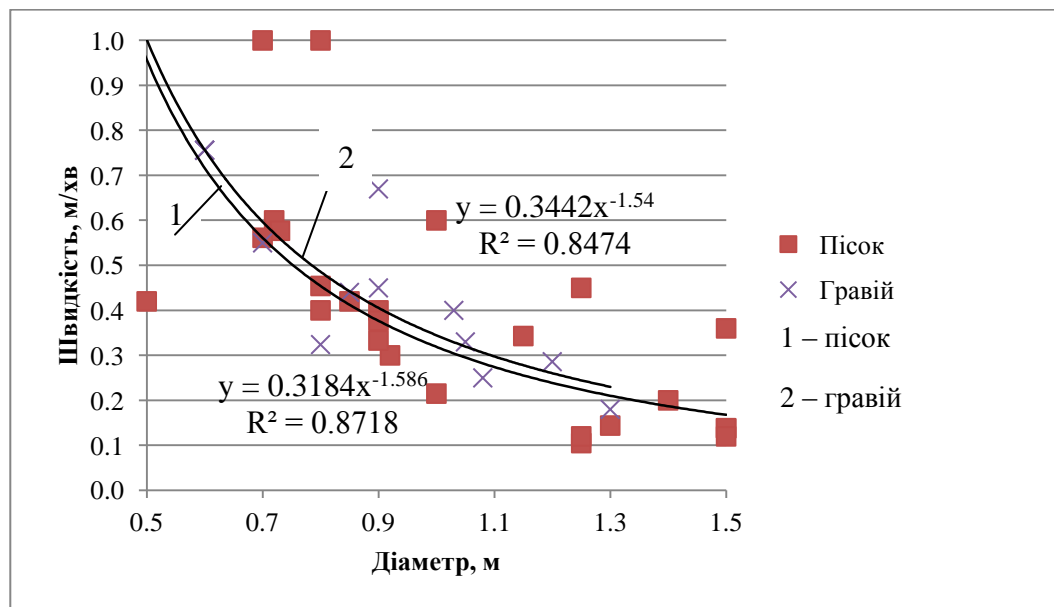


Рисунок 2.8 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від швидкості підняття гідромонітора в незв'язних ґрунтах (пісок, гравій)

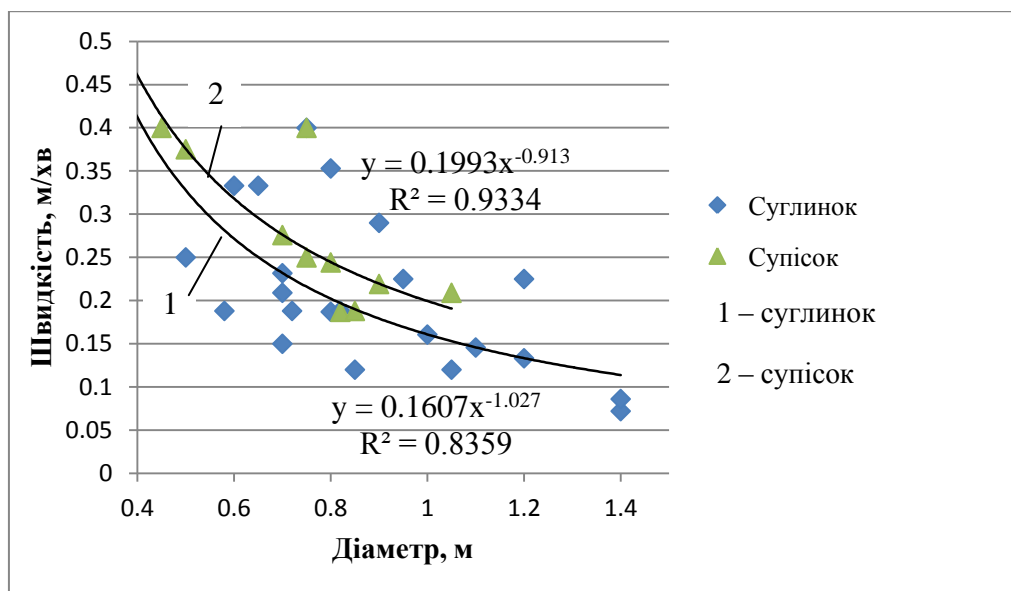


Рисунок 2.9 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від швидкості підняття гідромонітора в зв'язних ґрунтах (супісок, суглинок)

По областях точок були побудовані криві лінії, що апроксимують вихідні дані на основі рівняння регресії. Апроксимація визначалася за методом найменших квадратів.

Для незв'язних ґрунтів криві залежності діаметра від швидкості підняття наступні:

- для піску  $y = 0,3184x^{-1.586}$ , або  $V_{ni\partial} = 0,3184 \cdot D^{-1.586}$ ;
- для гравію  $y = 0,3442x^{-1.54}$ , або  $V_{ni\partial} = 0,3442 \cdot D^{-1.54}$ .

Для зв'язних ґрунтів криві залежності діаметра від швидкості підняття:

- для суглинку  $y = 0,1607x^{-1.027}$ , або  $V_{ni\partial} = 0,1607 \cdot D^{-1.027}$ ;
- для супіску  $y = 0,1993x^{-0,913}$ , або  $V_{ni\partial} = 0,1993 \cdot D^{-0,913}$ ;

де  $y$ ,  $V_{ni\partial}$  – швидкість підняття інструменту, м/хв,  $x$ ,  $D$  – діаметр ґрунтоцементної колони, м.

По побудованим кривим проведемо кореляційний аналіз для отримання коефіцієнта кореляції. Призначення кореляційного аналізу зводиться до виявлення наявності залежності між різними факторами. Тобто, визначається, чи впливає зменшення чи збільшення одного показника на зміну іншого.

Якщо залежність встановлена, то визначається коефіцієнт кореляції. На відміну від регресивного аналізу, це єдиний показник, який розраховує даний

метод статистичного дослідження. Коефіцієнт кореляції варіюється в діапазоні від +1 до -1. При наявності позитивної кореляції збільшення одного показника сприяє збільшенню другого. При негативній кореляції збільшення одного показника тягне за собою зменшення іншого. Чим більше модуль коефіцієнта кореляції, тим помітніше зміна одного показника відбивається на зміні другого. При коефіцієнті рівному 0 залежність між ними повністю відсутня.

Для кривої залежності швидкість підйому та діаметр коефіцієнт кореляції для піску:  $-0,843$ , для гравію:  $-0,904$ ; для суглинку:  $-0,794$ , для супіску:  $-0,810$ . Всі значення коефіцієнтів від'ємні, тобто при збільшенні швидкості підйому діаметр буде зменшуватися.

На рисунках 2.8 та 2.9 на кривих залежностей визначені та показані значення коефіцієнта детермінації. Коефіцієнт детермінації для моделі з константою приймає значення від 0 до 1. Чим ближче значення коефіцієнта до 1, тим сильніше залежність. При оцінці регресійних моделей це інтерпретується як відповідність моделі даних.

Для кривої залежності швидкість підйому та діаметр коефіцієнт детермінації: для піску:  $R^2=0,872$ , для гравію:  $R^2=0,874$ ; для суглинку:  $R^2=0,836$ , для супіску:  $R^2=0,933$ .

Розглядаючи побудовані залежності для двох типів ґрунтів, можна зробити такі висновки:

- отримані діаметри ґрунтоцементних колон при обробці незв'язного ґрунту більше, ніж при таких же параметрах в зв'язному ґрунті. Це пов'язано, в свою чергу, з міцністю ґрунту і опором руйнуванню високонапірним струменем;
- в незв'язних ґрунтах для діапазону діаметра 0,7–1,5 м – діапазон швидкості підйому 0,10–0,65 м/хв;
- в зв'язних ґрунтах для діапазону діаметра 0,5–1,1 м – діапазон швидкості підйому 0,10–0,45 м/хв;
- закономірність "чим вище швидкість – тим менше діаметр" відноситься до всіх типів ґрунту,

– для однакових діаметрів, наприклад, 0,90 м в пісках швидкість підйому буде 0,37 м/хв, в гравії – 0,40 м/хв, а для створення колони такого діаметру в зв'язних ґрунтах часу на виконання буде затрачено більше: в суглинку швидкість підйому – 0,23 м/хв, а в супіску – 0,17 м/хв. Або в перерахунку на час виконання 1 метра погонного ґрунтоцементної колони: в пісках – 2,7 хв, в гравії – 2,5 хв, в суглинку – 4,4 хв, в супіску – 6,0 хв – для зв'язних ґрунтів часу на виконання буде витрачено в два рази більше.

Отримані графіки (рис. 2.8, 2.9) не тільки узагальнюють залежність між геометричною характеристикою ґрунтоцементної колони і технологічним параметром, але і дозволяють полегшити підхід для вибору робочих параметрів бурового інструменту.

Приклад застосування графіка залежності діаметра ґрунтоцементної колони від швидкості підйому інструменту:

Для виконання колони проєктним діаметром 0,80 м в пісках скористаємося рівнянням для піску:

$$y = 0,3184x^{-1.586} \quad (2.9)$$

$$y = 0,3184 \cdot 0,8^{-1.586} = 0,45 \text{ (М/ХВ)}$$

Швидкість підйому гідромонітора:

$$V_{ni\partial} = \frac{1}{t_{ni\partial}}, \quad (2.10)$$

де  $t_{\text{под}}$  – час підйому гідромонітору

$$t_{ni\partial} = \frac{1}{V_{ni\partial}} = \frac{1}{45,3} = 2,2 \text{ (ХВ/М)} \quad (2.11)$$

Виходячи з типу ґрунту в прикладі – піщані ґрунти, крок підйому гідромонітору обираємо 4 см.

Час підйому гідромонітора це співвідношення часу на крок  $t_{\text{крок}}$  та висоти кроку (в нашому випадку  $h_{ni\partial} = 4 \text{ см}$ ):

$$t_{ni\partial} = \frac{t_{\text{крок}}}{h_{ni\partial}}, \quad (2.12)$$

$$t_{\text{крок}} = t_{\text{нід}} \cdot h_{\text{нід}} = \frac{2,2 \cdot 4 \cdot 60}{100} = 5,3 \text{ (с)}$$

На основі розрахунків можемо зробити висновок, що для виконання ґрунтоцементної колони діаметром 0,80 м в піщаних ґрунтах гідромонітор необхідно піднімати з кроком 4 см, витрачаючи на крок приблизно 6 с.

#### Енергія струменя цементного розчину – діаметр

Одним з найважливіших параметрів струменевої цементації є енергія струменя. Енергія розраховується шляхом добутку тиску струменя на витрати струменя і на час підйому гідромонітора:

$$E_{\text{cmp}} = P_{\text{cmp}} \cdot Q_p \cdot t_{\text{нід}}, \quad (2.13)$$

де  $P_{\text{cmp}} \cdot Q_p$  – потужність струменя на виході із сопла і  $t_{\text{нід}}$  – час прикладання струменя (або час підйому).

Багато авторів і компаній неодноразово відзначали різні залежності енергії струменя від діаметра одержуваної ґрунтоцементної колони, бо чим вище енергія, тобто її руйнуюча здатність, тим більше руйнуючий радіус струменя цементного розчину.

При обробці і аналізі практичних даних мною були отримані залежності, що не збігаються з описаними раніше в літературі і наукових працях.

На рисунках 2.10, 2.11 наведена залежність діаметра ґрунтоцементної колони від енергії струменя цементного розчину.

Для незв'язних ґрунтів криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину наступні:

- для піску  $y = e^{0.0271x}$ , або  $E_{\text{cmp}} = e^{0.0271 \cdot D}$ ;
- для гравію  $y = e^{0.0281x}$ , або  $E_{\text{cmp}} = e^{0.0281 \cdot D}$ .

Для зв'язних ґрунтів криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину:

- для суглинку  $y = e^{0.0358x}$ , або  $E_{\text{cmp}} = e^{0.0358 \cdot D}$ ;
- для супіску  $y = e^{0.0343x}$ , або  $E_{\text{cmp}} = e^{0.0343 \cdot D}$ ;

де  $y$ ,  $E_{стр}$  – енергія струменя цементного розчину, МДж/м,  $x$ ,  $D$  – діаметр грунтоцементної колони, м.

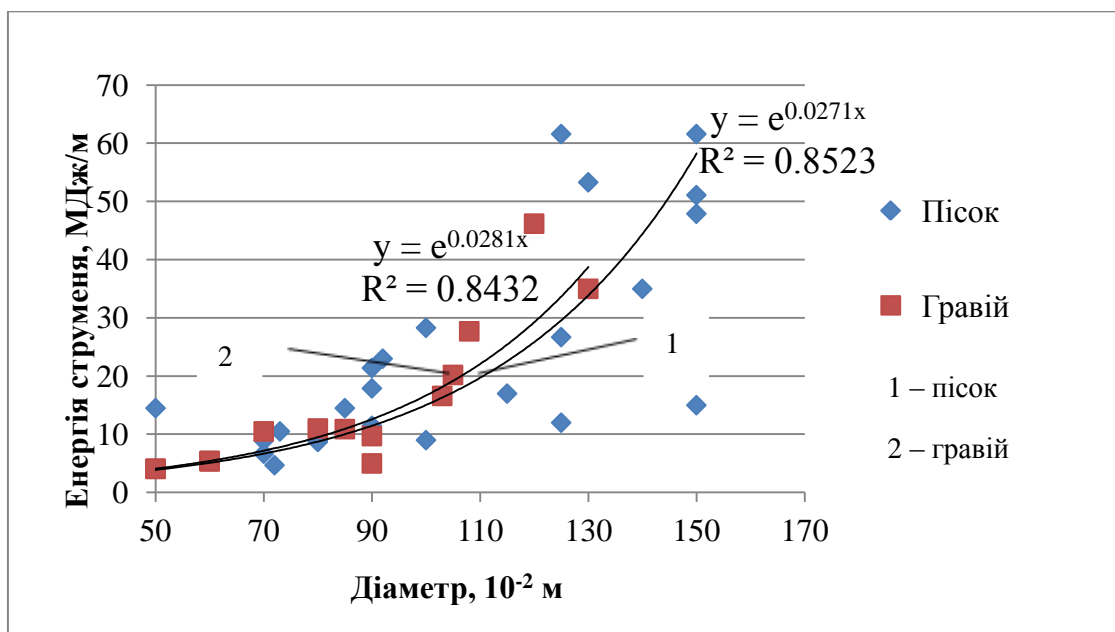


Рисунок 2.10 – Залежність діаметра грунтоцементної колони від енергії струменя цементного розчину в незв'язних грунтах (пісок, гравій)

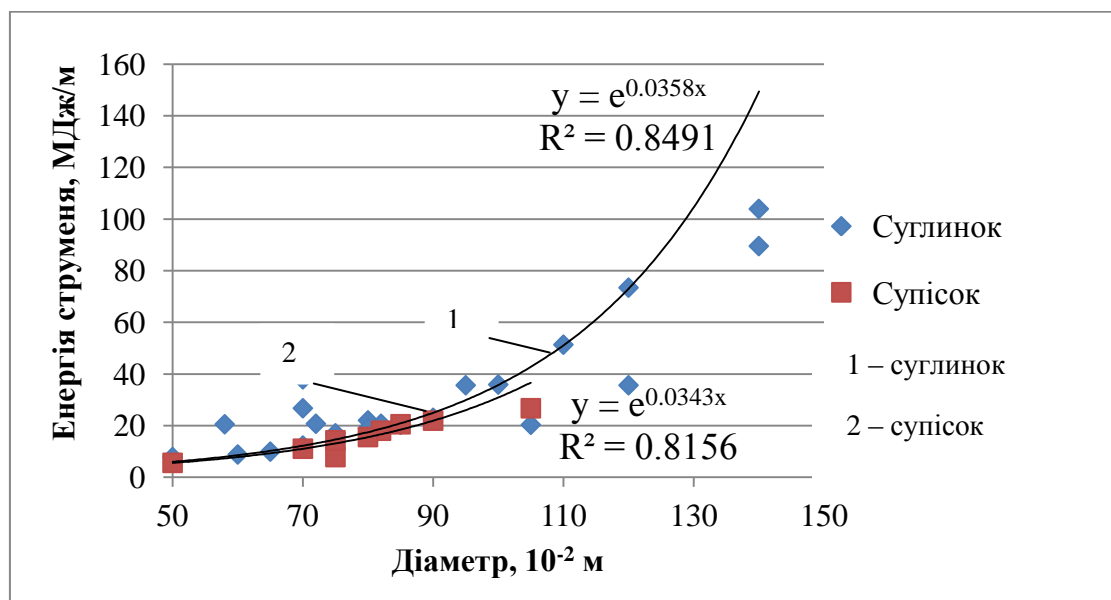


Рисунок 2.11 – Залежність діаметра грунтоцементної колони від енергії струменя цементного розчину в зв'язних грунтах (супісок, суглинок)

Для кривої залежності енергія струменя та діаметра коефіцієнт кореляції для піску: 0,771, для гравію: 0,861; для суглинку: 0,829, для супіску: 0,874. Всі

значення коефіцієнтів від'ємні, тобто при збільшенні швидкості підйому діаметр буде зменшуватися. На рис. 2.10 та 2.11 на кривих залежностей визначений та показаний значення коефіцієнта детермінації. Для кривої залежності енергія струменя та діаметра коефіцієнт детермінації: для піску:  $R^2=0,852$ , для гравію:  $R^2=0,843$ ; для суглинку:  $R^2=0,849$ , для супіску:  $R^2=0,816$ .

### Приклад застосування графіка залежності діаметра ґрунтоцементної колони від енергії струменя:

Для перевірки можливості застосування отриманих графіків на практиці прийняті вихідні данні з будівельного об'єкту, на якому були заміряні виконані ґрунтоцементні колони. Експоненціальну залежність (рис. 2.10) будемо використовувати для розрахунку діаметра колони в залежності від вхідних параметрів:

Ґрунтові умови – піски водонасичені, дрібні, середньої крупності.

В/Ц цементного розчину – 1.

Щільність цементного розчину  $\rho_p$  – 1,51 т/м<sup>3</sup>.

Витрати розчину  $Q_p$  – 100 л/хв = 0,1 м<sup>3</sup>/хв.

Тиск на виході насосу – 450 атм = 45 МПа.

Діаметр сопла  $d_c$  – 2,4 мм.

Кількість сопел  $n_c$  – 2 шт.

Швидкість струменя на виході із сопла:

$$V_{cmp} = \frac{4 \cdot Q_p / (\pi \cdot d_c^2)}{n_c} = \frac{(400 \cdot 100) / (3,1416 \cdot 2,4^2)}{2} = 184,3 \text{ (м/с)} \quad (2.14)$$

Тиск рідини (цементного розчину) у відповідності до рівняння Бернуллі:

$$P = 0,5 \cdot \rho_p \cdot V_{cmp}^2 = 0,5 \cdot \rho_p \cdot \left( \frac{Q_p}{\pi d_c^2 / 4} \right)^2 = \frac{0,5 \cdot 1,51 \cdot 184,3^2}{100} = 256,4 \text{ (атм)} \quad (2.15)$$

Потужність струменя цементного розчину:

$$W_{cmp} = \frac{P_{cmp} \cdot Q_p}{600} = \frac{256,4 \cdot 100}{600} = 42,7 \text{ (кВт)} \quad (2.16)$$

Час підйому гідромонітора:

$$t_{нод} = \frac{t_{крок}}{h_{нид}} = \frac{100 \cdot 10}{60 \cdot 4} = 4,17 \left( \frac{хв}{м} \right), \quad (2.17)$$

де  $t_{крок}$  – час на крок,

$h_{нид}$  – висота кроку, см.

Швидкість підйому гідромонітора:

$$V_{нод} = \frac{100}{t_{нод}} = \frac{100}{4,17} = 24 \text{ см/хв} = 0,24 \left( \frac{м}{хв} \right) \quad (2.18)$$

Енергія струменя розчину:

$$E_{cmp} = W_{cmp} \cdot t_{нид} = \frac{42,7 \cdot 4,17 \cdot 60}{1000} = 10,7 \left( \frac{МДж}{м} \right) \quad (2.19)$$

Для розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони використаємо побудовану на рисунку 2.23 експоненціальну криву для піску підставивши замість  $x$  та  $y$  відповідні позначення, технологічні та геометричні:

$$y = e^{0.0271x} \text{ або } E_{cmp} = e^{0.0271 \cdot D} \quad (2.20)$$

$$D = \frac{\log(10.7)}{\log(1.027470545)} = 87.46 (10^{-2} \text{ м}) = 0,87 \text{ (м)}$$

Скористаємося рекомендаціями італійських вчених з Університету Кассіно в Італії G. Modoni та P. Croce [62] з розрахунку діаметру ґрунтоцементної колони для порівняння з виконаним розрахунком з використанням кривої залежності діаметру від енергії струменя:

$$D = 1.128 \sqrt{P \cdot V_{ц,розч} \cdot \lambda_E}, \quad (2.21)$$

де  $P$  – тиск, МПа,

$V_{ц,розч}$  – об'єм заін'єктованого цементного розчину, м<sup>3</sup>/м,

$\lambda_E$  – енергетична ефективність, м<sup>3</sup>/МДж.

Витрати цементного розчину:

$$V_{ц,розч} = Q_p \cdot t_{нид} = 100 \cdot 4,17 = 417 \text{ л/м} = 0,417 \left( \frac{м^3}{м} \right) \quad (2.22)$$

Описана формула дозволяє розрахувати діаметр на ранньому етапі проєктування, коли дані по ґрунту ще не відомі. Розрахунок виконується на основі дослідних даних за енергетичною ефективністю. Оскільки в цьому порівняльному прикладі використовуються дані по об'єкту, що був успішно



виконаний, то і енергетичну ефективність розрахуємо, скориставшись формулою (2.6) та вже відомими значеннями діаметру та енергії струменя:

$$\lambda_E = \frac{V_c}{E'} = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4 \cdot 10,7} = 0,036 \text{ (м}^3\text{/МДж)}, \quad (2.23)$$

де  $V_c$  – об'єм одиниці довжини колони, м<sup>3</sup>/м,  $E'$  – енергія струменя, МДж.

При невідомих значеннях енергії струменя можна скористатися таблицею 2.4.

Таблиця 2.4 – Середні значення енергетичної ефективності та об'ємної ефективності для однокомпонентної струменевої цементації

<i>Грунт</i>	<i>Енергетична ефективність, м<sup>3</sup>/МДж</i>	<i>Об'ємна ефективність, МДж/м<sup>3</sup></i>
Гравій з піщаним заповнювачем	0,067–0,100	10–15
Від гравійного піску до мулистого піску	0,033–0,067	15–30
Від піщаного мулу до глинистого мулу (низької консистенції)	0,020–0,033	30–50
Від піщаного мулу до глинистого мулу (високої консистенції)	<0,025	>50

Після всіх розрахунків повертаємося до формули:

$$D = 1,128 \sqrt{P \cdot V_{\text{ц,розч}} \cdot \lambda_E} = 1,128 \sqrt{45 \cdot 0,417 \cdot 0,036} = 0,93 \text{ (м)} \quad (2.24)$$

Згідно з розрахунком за допомогою побудованої кривої залежності енергії струменя від діаметру грунтоцементної колони отримуємо для енергії струменя 10,7 МДж діаметр 0,87 м. Відповідно до формули розрахунку діаметру, розробленої італійськими вченими, для того ж значення енергії – діаметр становить 0,93 м, що більше діаметру, розрахованого за формулою експериментальної кривої діаметр–енергія (рис. 2.10).

Виходячи з того, що використані дані були взяті з вже виконаного об'єкта, де фактичний діаметр колони становив 0,70 м, необхідно прийняти до уваги поправку на водонасичений ґрунт з понижуючим коефіцієнтом 0,81, тобто відношення фактичного діаметру до діаметру, розрахованого за

побудованою кривою залежності діаметра від енергії (рис. 2.23), дорівнює  $0,70/0,87=0,81$ .

Беручи до уваги висловлювання G. Modoni та P. Croce [62] про відповідність розрахункових діаметрів та діаметрів виконаних колон – різниця може сягати до  $\pm 20\%$ , тому вибір на етапі проєктування має врахувати мінімальне значення такого очікуваного діапазону змін (тобто використовувати значення  $0,8D$ ).

Даним розрахунком підтверджено практичне значення отриманих кривих залежностей діаметра ґрунтоцементної колони від енергії струменя цементного розчину.

### **2.3 Методика визначення витрати цементного розчину і діаметра ґрунтоцементних колон в залежності від технологічних параметрів**

Технологія струменевої цементації використовується для досягнення різних будівельних і геотехнічних цілей, оскільки дозволяє створити елементи різної конфігурації та довжини в різних за складністю інженерно–геологічних умовах.

Проєкт з використанням струменево–цементацийних елементів, як і будь–який інший проєкт, повинен бути розроблений з урахуванням всіх кроків, починаючи від характеристики будівельної ділянки до оцінки фінансових витрат. Але у порівнянні з іншими традиційними геотехнічними спорудами, слід зазначити, що технологічні аспекти струменевої цементації відіграють більш важливу роль.

До звичайного процесу проєктування необхідно додати специфічні аспекти, пов'язані з струменевою цементацією:

- вибір типу струменевої цементації,
- оцінка параметрів обробки ґрунту,
- прогнозування розмірів і міцності струменево–цементацийних елементів.
- аналіз можливого небажаного впливу на навколишні будівлі та споруди.

Кращим варіантом для інженера буде поєднання теоретичних і технологічних знань, для того щоб на практиці можливими рішеннями забезпечити безпеку, функціональність і економічну доцільність.

На основі отриманих залежностей технологічних параметрів від діаметру ґрунтоцементної колони, що були описані вище, було розроблено методику визначення діаметру в залежності від типу ґрунту, тиску струменя, швидкості підйому гідромонітору та витрат цементного розчину. Розрахунок виконаний на прикладі будівельного об'єкта в с. Гавронщина (Київська область) під час виконання пальових фундаментів з ґрунтоцементних колон за технологією струменевого ін'єктування.

Вхідні дані:

Ґрунтові умови – піски водонасичені, дрібні, середньої крупності.

В/Ц цементного розчину – 1.

Щільність цементу  $\rho_u$  – 3,1 т/м<sup>3</sup>.

Витрати розчину  $Q_p$  – 100 л/хв = 0,1 м<sup>3</sup>/хв.

Діаметр сопла  $d_c$  – 2,4 мм.

Кількість сопел  $n_c$  – 2 шт.

Витрати цементу на 1 м<sup>3</sup> розчину:

$$m_u = \frac{1000 - \frac{m_b}{\rho_b}}{\frac{1}{\rho_u} + (B:Ц)} = \frac{1000 - 0}{\frac{1}{3,1} + 1} = 756 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (2.25)$$

де  $m_u$  – маса цементу,

$m_b$  – маса бентоніту,

$\rho_b$  – щільність бентоніту.

Витрати води на 1 м<sup>3</sup> розчину:

$$m_v = 1000 - \frac{m_u}{\rho_u} - \frac{m_b}{\rho_b} = 1000 - \frac{756}{3,1} - 0 = 756 \text{ (кг/м}^3\text{)} \quad (2.26)$$

Щільність розчину:

$$\rho_p = \frac{m_u + m_b + m_v}{1000} = \frac{756 + 756 + 0}{1000} = 1,51 \text{ (т/м}^3\text{)} \quad (2.27)$$

Швидкість струменя на виході із сопла:

$$V_{cmp} = \frac{4 \cdot Q_p / (\pi \cdot d_c^2)}{n_c} = \frac{(400 \cdot 100) / (6 \cdot 3,1416 \cdot 2,4^2)}{2} = 184,3 \text{ (м/с)} \quad (2.28)$$

Тиск рідини (цементного розчину) у відповідності з рівнянням Бернуллі:

$$P = 0,5 \cdot \rho_p \cdot V_{cmp}^2 = 0,5 \cdot \rho_p \cdot \left( \frac{Q_p}{\pi d_c / 4} \right)^2 = \frac{0,5 \cdot 1,51 \cdot 184,3^2}{100} = 256,4 \text{ (атм)} \quad (2.29)$$

Потужність струменя цементного розчину:

$$W_{cmp} = \frac{P_{cmp} \cdot Q_p}{600} = \frac{256,4 \cdot 100}{600} = 42,7 \text{ (кВт)} \quad (2.30)$$

Час підйому гідромонітора

$$t_{nod} = \frac{t_{крок}}{h_{нид}} = \frac{100 \cdot 10}{60 \cdot 4} = 4,17 \left( \frac{\text{хв}}{\text{м}} \right), \quad (2.31)$$

де  $t_{крок}$  – час на крок,

$h_{нид}$  – висота кроку, см.

Швидкість підйому гідромонітора:

$$V_{nod} = \frac{100}{t_{nod}} = \frac{100}{4,17} = 24 \text{ см/хв} = 0,24 \left( \frac{\text{м}}{\text{хв}} \right) \quad (2.32)$$

Енергія струменя розчину:

$$E_{cmp} = W_{cmp} \cdot t_{нид} = \frac{42,7 \cdot 4,17 \cdot 60}{1000} = 10,7 \left( \frac{\text{МДж}}{\text{м}} \right) \quad (2.32)$$

Використаємо побудовану на рисунку 2.23 експоненціальну криву для піску:

$$y = e^{0.0271x} \quad (2.34)$$

або підставивши замість  $x$  та  $y$  відповідні позначення отримаємо рівняння у вигляді:

$$E_{cmp} = e^{0.0271 \cdot D} \quad (2.35)$$

$$10,7 = 2,718282^{0.0271 \cdot D} \quad (2.36)$$

$$D = \frac{\log(10.7)}{\log(1.027470545)} = 87.46 (10^{-2} \text{ м}) = 0,87 \text{ (м)} \quad (2.37)$$

Теоретичні витрати цементного розчину:

$$Q_{ц.терет} = V_p \cdot m_{ц} = Q_p \cdot t_{нид} \cdot m_{ц} = (100 \cdot 4,17 \cdot 756) / 1000 = 315 \left( \frac{\text{кг}}{\text{н.м}} \right) \quad (2.38)$$

*Порівняння результату розрахунків з методикою розрахунку G. Modoni та P. Croce, Італія*

Скористаємося рекомендаціями італійських вчених з Університету Кассіно в Італії G. Modoni та P. Croce [62] з розрахунку діаметру ґрунтоцементної колони для порівняння з виконаним розрахунком з використанням кривої залежності енергії струменя від діаметра:

$$D = 1.128 \sqrt{P \cdot V_{\text{ц.розч}} \cdot \lambda_E} \quad (2.39)$$

де  $P$  – тиск, МПа,

$V_{\text{ц.розч}}$  – об'єм заін'єктованного цементного розчину, м<sup>3</sup>/м,

$\lambda_E$  – енергетична ефективність, м<sup>3</sup>/МДж.

Витрати цементного розчину:

$$V_{\text{ц.розч}} = Q_p \cdot t_{\text{нід}} = 100 \cdot 4,17 = 417 \text{ л/м} = 0,417 \text{ (м}^3\text{/м)} \quad (2.30)$$

Описана формула дозволяє розрахувати діаметр на ранньому етапі проєктування, коли дані по ґрунту ще не відомі. Розрахунок виконується на основі дослідних даних за енергетичною ефективністю. Оскільки в цьому порівняльному прикладі використовуються дані виконаного об'єкта, енергетичну ефективність розрахуємо скориставшись формулою (2.6) та вже відомими значеннями діаметру та енергії струменя:

$$\lambda_E = \frac{V_c}{E'} = \frac{3,14 \cdot 0,7^2}{4 \cdot 10,7} = 0,036 \text{ м}^3\text{/МДж}, \quad (2.31)$$

де  $V_c$  – об'єм одиниці довжини колони, м<sup>3</sup>/м,  $E'$  – енергія струменя, МДж.

При невідомих значеннях енергії струменя можна скористатися значеннями з таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Середні значення ефективності

Ґрунт	Енергетична ефективність, м <sup>3</sup> /МДж	Об'ємна ефективність, МДж/м <sup>3</sup>
Гравій з піщаним заповнювачем	0,067–0,100	10–15
Від гравійного піску до мулистого піску	0,033–0,067	15–30
Від піщаного мулу до глинистого мулу (низ.конс.)	0,020–0,033	30–50
Від піщаного мулу до глинистого мулу (високої консистенції)	<0,025	>50

Згідно з розрахунком відповідно до побудованої кривої залежності енергії струменя від діаметру ґрунтоцементної колони (рис. 2.10) отримано для енергії струменя 10,7 МДж величину діаметра 0,87 м. Відповідно до формули розрахунку діаметру, розробленої італійськими вченими, для того ж значення енергії – діаметр складає 0,93 м при фактичному 0,70 м (рис. 2.12).

*Порівняння результату розрахунків з методикою розрахунку, розробленою компанією Soletanche Bachy, Франція*

Компанією Soletanche Bachy, Франція [39] на основі дослідних даних була побудована залежність між енергією струменя та діаметром колони  $D$  з коефіцієнтами  $K$  для різних типів ґрунтів:

$$E_{cmp} = K \cdot D^3 \quad (2.33)$$

З формули (2.33) визначимо діаметр, скориставшись коефіцієнтом  $K$  для піщаних ґрунтів 0,0000156:

$$D = \sqrt[3]{\frac{E_{cmp}}{K}} = \sqrt[3]{\frac{10.7}{0,0000156}} = 88 \text{ см} = 0,88 \text{ м} \quad (2.34)$$

Фактичний діаметр ґрунтоцементних колон склав 0,70 м при проектному 0,60 м (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Фактичний діаметр ґрунтоцементної колони

За результатами розрахунків діаметру ґрунтоцементної колони в водонасичених пісках за розробленою в дисертаційній роботі методикою та двох перевірочних методик італійських вчених та французької компанії складемо порівняльну таблицю (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Значення розрахункових діаметрів

Тип ґрунту	Діаметр ґрунтоцементної колони, м				
	Проектний діаметр (згідно з проєктною документацією), м	Фактичний діаметр, м	Власна методика, м	Методика G. Modoni та P. Croce, м	Методика компанії Soletanche Bachy, м
Водонасичений пісок	0,60	0,70	0,87	0,93	0,88

Розроблена в дисертаційній роботі методика визначення діаметру ґрунтоцементної колони в залежності від енергії цементного струменя дає найближчий результат до фактичного значення діаметру колони, виконаної в водонасичених пісках. Наступне найближче значення у французької, останнє – у італійської.

Необхідно зазначити, що використання методу розрахунку французької компанії неможливо за її межами, оскільки розроблені коефіцієнти для кожного типу ґрунту – є інтелектуальною власністю і використовуються виключно всередині компанії.

Метод розрахунку діаметру італійських вчених заснований на енергетичній ефективності виконання ґрунтоцементної колони, що визначається як співвідношення об'єму колони до витраченої енергії на її виконання. Тобто для використання даного методу необхідно мати велику практичну базу досліджених ґрунтоцементних елементів в різних типах ґрунтів для точного визначення значення ефективності. При відсутності напрацьованих практичних значень можна використати табличні значення (табл. 2.5), але типи, що представлені в ній, не розповсюджені на території України, що і є основною складністю застосування італійської методики.

### Застосування розробленої методики розрахунку в різних типах ґрунту

Для порівняння використання побудованих кривих залежності енергії струменя від діаметру ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів були зроблені розрахунки для різних об'єктів, а результати занесені в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахункові значення діаметрів ґрунтоцементних колон

№, n/n	Об'єкт	Тип ґрунту	Проектний діаметр, м	Фактичний діаметр, м	Розрахунковий діаметр, м		
					Власна методика	Методика G. Modoni та P. Croce	Методика компанії Soletanche Bachy
1	с. Гавронщина, Київська обл.	Пісок водонасичений	0,60	0,70	0,87	0,93	0,88
2	"Будівля банку Універсальний", м. Львів	Суглинок м'якопластичний заторфований	0,70	0,80 0,75 0,9	0,91	0,89	0,99
3	"Будівля Лейпциг", м. Київ	Супісок лесоподібний, просідний	0,60	0,60	0,74	0,79	0,79
4	"Андріївська церква", м. Київ	Супісок пилюватий твердий	0,60	0,60	0,74	0,79	0,79
5	Будівля "Гостинний двір", м. Київ	Пісок пилюватий, низького водонасичення	0,60	0,68–0,70	0,88	0,94	0,89

Порівняльною таблицею застосування розробленої в дисертаційній роботі методики визначення діаметру струменево-цементацийної колони та двох інших для різних типів ґрунту ще раз було доведено, що отримані розрахункові значення діаметрів за власною методикою є найближчими до фактичних.

Таблиця 2.8 – Коригуючі коефіцієнти для різних типів ґрунтів

Тип ґрунту		Експериментальна залежність	Коригуючі коефіцієнт, $K$
Пісок	водонасичений	$E_{cmp} = K \cdot e^{0.0271 \cdot D}$	$K = 0,80$
	низького водонасичення		
Супісок лесовий, просідний		$E_{cmp} = K \cdot e^{0.0358 \cdot D}$	
Супісок пилюватий твердий			
Суглинок м'якопластичний заторфований		$E_{cmp} = K \cdot e^{0.0343 \cdot D}$	$K = 0,90$



В залежності від отриманих по розробленій методиці результатів та результатів замірів діаметрів ґрунтоцементних колон в різних типах ґрунтів введемо коригуючі коефіцієнти (співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів) (табл. 2.8): для пісків та супісків – 0,80, для суглинків – 0,9. Для заторфованих ґрунтів та для інших типів суглинків необхідно провести додаткові дослідження з замірюванням виконаних ґрунтоцементних колон.

## Висновки за розділом 2

В результаті проведених досліджень підтверджено, що всі параметри в струменево–цементацийному процесі пов'язані між собою. І всі параметри, в тій чи іншій мірі, беруть участь в реалізації емпіричних і чисельних методів оцінки діаметра ґрунтоцементного елемента.

На основі дослідних даних виконано аналіз взаємозв'язку технологічних параметрів струменевої цементації та діаметру ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів. Дослідні дані розділено по типу ґрунтів – незв'язні і зв'язні: піски і гравій, супісок і суглинок. Серед технологічних параметрів обрано наступні: тиск цементного струменя, витрати розчину, швидкість підйому інструмента та один з найважливіших параметрів – руйнівна енергія струменя.

Аналіз залежності "*тиск цементного струменя – діаметр*" дав наступні висновки:

- при однаковому тиску струменя цементного розчину діаметри в незв'язних ґрунтах перевищують діаметри колон в зв'язних ґрунтах, що пов'язано з великим опором зв'язного ґрунту руйнуванню;
- область робочих параметрів тиску струменя для однокомпонентної струменевої технології для незв'язних ґрунтів – 25,0–45,0 МПа, для зв'язних ґрунтів – 30,0–50,0 МПа.

При дослідженні залежності *"витрати цементного розчину – діаметр"* основний пункт, який необхідно виділити – на руйнування зв'язних ґрунтів витрачається більша кількість розчину.

Використовуючи описані залежності можна розрахувати діаметр сопла на гідромоніторі для того, щоб отримати тиск і витрати необхідного струменя, беручи до уваги щільність використовуваного розчину.

Добуток тиску на витрати цементного розчину дадуть потужність струменя, що в свою чергу, дозволить обрати висконапірний насос з відповідними робочими параметрами.

Дослідження взаємозв'язку *"швидкість підйому інструмента – діаметр"* дало можливість апроксимувати дані і побудувати наступні залежності:

Для **незв'язних ґрунтів** криві залежності діаметру від швидкості підняття наступні:

- для піску  $y = 0,3184x^{-1.586}$ , або  $V_{nid} = 0,3184 \cdot D^{-1.586}$
- для гравію  $y = 0,3442x^{-1.54}$ , або  $V_{nid} = 0,3442 \cdot D^{-1.54}$ .

Для **зв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від швидкості підняття:

- для суглинку  $y = 0,1607x^{-1.027}$ , або  $V_{nid} = 0,1607 \cdot D^{-1.027}$
- для супіску  $y = 0,1993x^{-0,913}$ , або  $V_{nid} = 0,1993 \cdot D^{-0,913}$ .

де  $y$ ,  $V_{nid}$  – швидкість підняття інструменту, м/хв.,  $x$ ,  $D$  – діаметр ґрунтоцементної колони, м.

Отримані графіки не тільки узагальнюють залежність між геометричною характеристикою ґрунтоцементної колони і технологічним параметром, але і дозволяють полегшити підхід для вибору робочих параметрів бурового інструменту.

При обробці і аналізі практичних даних отримано залежності *"енергія струменя – діаметр"*, що не збігаються з описаними раніше в літературі і наукових працях.

Для **незв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину наступні:

- для піску  $y = e^{0.0271x}$ , або  $E_{cmp} = e^{0.0271 \cdot D}$
- для гравію  $y = e^{0.0281x}$ , або  $E_{cmp} = e^{0.0281 \cdot D}$ .

Для **зв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину:

- для суглинку  $y = e^{0.0358x}$ , або  $E_{cmp} = e^{0.0358 \cdot D}$
- для супіску  $y = e^{0.0343x}$ , або  $E_{cmp} = e^{0.0343 \cdot D}$ ,

де  $y, E_{cmp}$  – енергія струменя цементного розчину, МДж/м,  $x, D$  – діаметр ґрунтоцементної колони,  $10^{-2}$  м.

Практичне значення отриманих залежностей перевірено на прикладі виконаного будівельного об'єкта.

Для порівняння використання побудованих кривих залежності енергії струменя від діаметру ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів зроблено розрахунки для різних об'єктів, що в свою чергу, дозволили ввести *коригуючі коефіцієнти* для ґрунтових умов України – для *пісків та супісків* – 0,80, для *суглинків* – 0,9.

На основі отриманих залежностей технологічних параметрів від діаметру ґрунтоцементної колони, розроблено методику визначення діаметру в залежності від типу ґрунту, тиску струменя, швидкості підйому гідромонітору та витрат цементного розчину.

Розроблена в дисертаційній роботі методика дозволить проєктувати підсилення ґрунтових масивів без натурних випробувань та експериментальних досліджень.

Питання вибору оптимальних технологічних параметрів для виконання ґрунтоцементних колон виконаних за двохкомпонентною струменевою цементациєю описані здобувачем в роботі [75].

## РОЗДІЛ 3

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНИ УЩІЛЬНЕНОГО ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ ТА ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЇЇ УТВОРЕННЯ

#### 3.1 Вплив процесу струменевої цементациї на фізико–механічні характеристики навколишнього масиву

Після вивчення і дослідження взаємозв'язку технологічних параметрів струменевої цементациї та порядку розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони залишається питання про вплив виконання струменево–цементацийних елементів на оточуюче ґрунтове середовище.

Високонапірний струмінь, завдаючи удари по ґрунту, руйнує його вихідну структуру і, згідно з дослідженням Канематцу в роботі [82], зони високонапірного струменя (в дослідній роботі струменя води) представляють собою: зона 1 – ядро, гідродинамічний тиск в якій постійний; зона 2 – проміжна зона і, як правило, відстань до кінця зони 2 дорівнює 300 діаметрів сопла; зона 3, де потік втрачає фокусування, стає переривчастим і починають переважати кавітаційні ефекти (рис. 3.1).

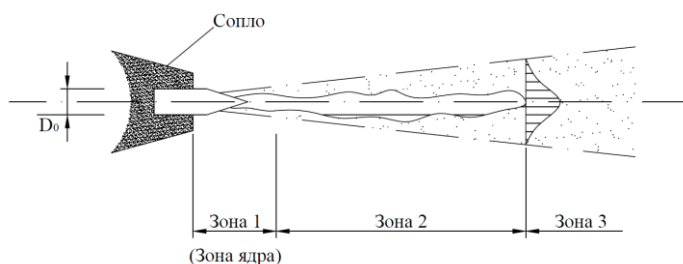


Рисунок 3.1 – Характеристики водного струменя по Канематцу

Розподіл гідродинамічного тиску в зоні 3 уздовж осі струменя зменшується з відстанню за експонентою. Якщо випустити струмінь води в щільне середовище або чисту воду, то виявляється, що зони 3 не існує. Ця обставина характерна для більшості випадків струменевої цементациї.

Високий тиск призводить до змішування ґрунту і безперервного його руйнування в межах радіусу впливу струменя. Отже, ґрунтуючись на своїх висновках, Канематцу припустив, що застосування струменевої цементації не впливає на напружено–деформований стан в ґрунті за межами радіусу впливу. Фактично, навіть при роботі з дуже високим тиском, процес ін'єкції призводить тільки до збільшення тиску в межах області, що руйнується (зона 1 і 2). Таку ж думку підтримують в своїх роботах С. С. Ковіл і А. Є. Скіннер [60].

У той же час практикуючі організації, ґрунтуючись на дослідних даних, показали, що виконання струменево–цементацийних елементів круглого перетину впливає на оточуючий їх ґрунтовий масив за межами цих елементів [102].

Компанією Consolidamenti e Pali [102] в Італії були виконані ряд лабораторних тестів ґрунтів, що оточують колодязь, виконаний з колон струменевого ін'єктування, що пересікаються (рис. 3.2).

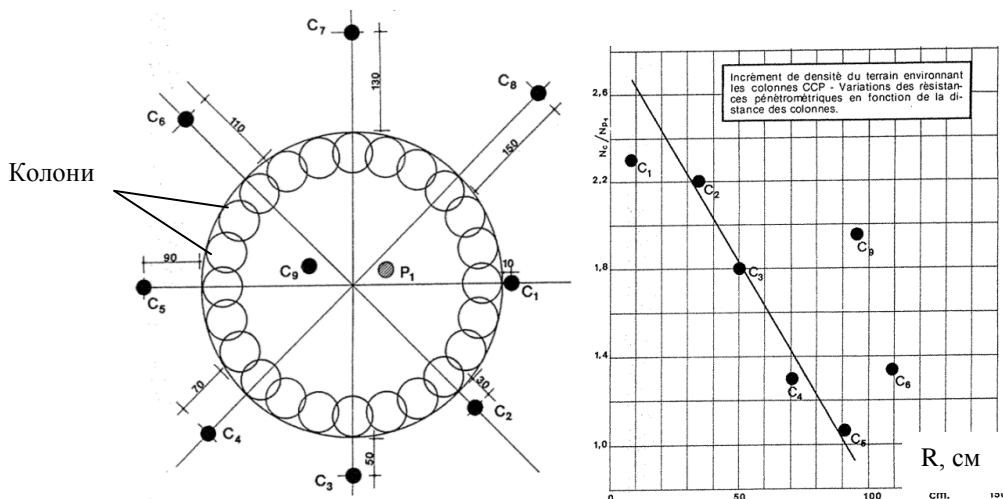


Рисунок 3.2 – Щільність ґрунту навколо колони струменевої цементації в залежності від радіальної відстані

Максимальний вплив високонапірного струменя на навколишній ґрунтовий масив спостерігається на відстані 10 і 30 см (зразки  $c_1$  і  $c_2$ ), граничний вплив на фізико–механічні характеристики ґрунту спостерігаються на відстані 110 см ( $c_6$ ), 130 см ( $c_7$ ) та 150 см ( $c_8$ ).

Таким чином, в практиці застосування струменевої технології є два діаметрально протилежних твердження про вплив на оточуюче ґрунтове середовище під час виконання ґрунтоцементних елементів. Дослідження цього питання було внесено до переліку завдань дисертаційної роботи, щоб на практиці підтвердити вплив високонапірного струменя на оточуючий ґрунтовий масив за межами ґрунтоцементної колони.

### **3.2 Експериментальні дані з дослідження ґрунтоцементної основи в різних типах ґрунтів**

Для вивчення впливу виконання елементів струменевої цементації на навколишній масив ґрунту в даному розділі будуть представлені дослідні дані з об'єктів, де виконувалось підсилення ґрунтової основи фундаменту струменево–цементаційними колонами на території України. Для вирішення поставленого завдання з дослідження впливу на оточуюче ґрунтове середовище паралельно виконувалося лабораторне випробування матеріалу ґрунтоцементних колон.

#### ***Підсилення фундаментів будівлі Банку «Універсальний» в м. Львові (заторфовані суглинки)***

Проект підсилення, а також роботи з даного об'єкту були виконані СП "Основа–Солсиф" в 2006 році. Будівля, що підсилювалася, належить Банку "Універсальний" і знаходиться в м. Львові по проспекту Шевченка, 27.

Реконструйована чотириповерхова будівля (рис. 3.3) побудована з цегли і каменю в 1909 році. Фундаменти під зовнішні та внутрішні стіни – стрічкові, цегляні на бетонних подушках товщиною 300 мм, ширина плит стрічкових фундаментів під зовнішніми та внутрішніми стінами дорівнює 2,6 м. Зовнішні та внутрішні стіни – несучі з повнотілої цегли.

У зв'язку з погіршенням фізико–механічних характеристик ґрунтів внаслідок їх водонасичення будівля до реконструкції зазнала значних вертикальних деформацій (30–80 мм), про що свідчать вертикальні і похилі

тріщини на стелях, в перекриттях і в несучих стінах будівлі. Підземні води залягають на глибині 3,6–3,9 м від поверхні землі безпосередньо під подошвою фундаменту.



Рисунок 3.3 – Будівля банку "Універсальний", м. Львів

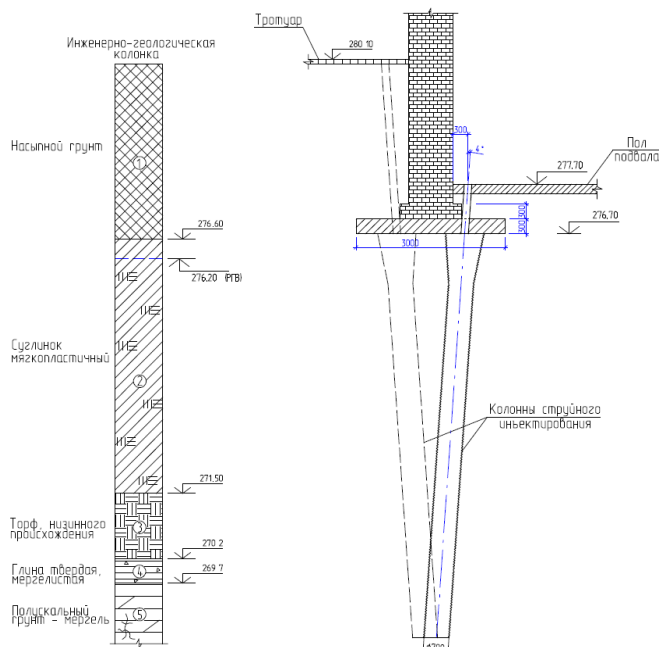


Рисунок 3.4 – Схема підсилення фундаментів

Проектне рішення складалося з улаштування струменево–цементацийних колон в основі фундаментів таким чином, щоб при обраному куті нахилу буріння колони були максимально наближені до осі фундаментів для рівномірного розподілу на них навантаження від будівлі. Проектний діаметр колон складає 700 мм. Довжина колон (7–8 м) приймалася в залежності від геологічних умов майданчика за умови, що нижня частина колони заходила в шар мергелю. Принцип влаштування колон струменевого ін'єктування показаний на рисунку 3.4.

#### Дослідження зразків ґрунту в міжколонному просторі

На об'єкті підсилення фундаментів будівлі в м. Львові по проспекту Шевченка, 27, були відібрані зразки ґрунту, що оточує колони (рис. 3.5), і виконано лабораторні тести на визначення фізико–механічних характеристик зразків (рис. 3.6, 3.7).

За результатами попередніх інженерно–геологічних досліджень ґрунти, що залягають під підшвою фундаментів, представлені суглинком м'якопластичним темно–сірим, коричнево–сірим з домішками органічних речовин, з лінзами і прошарками глин слабозаторфованих.

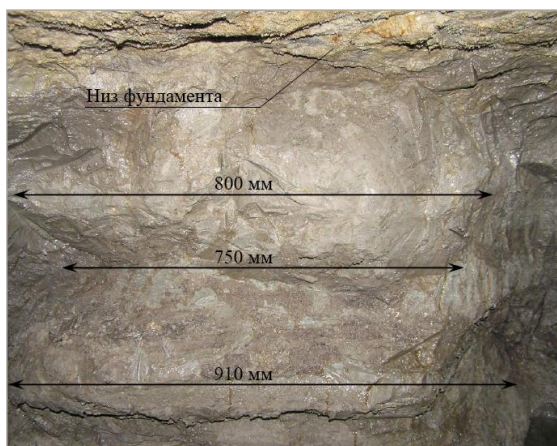


Рисунок 3.5 – Фактичні розміри



Рисунок 3.6 – Відбір зразків ґрунту

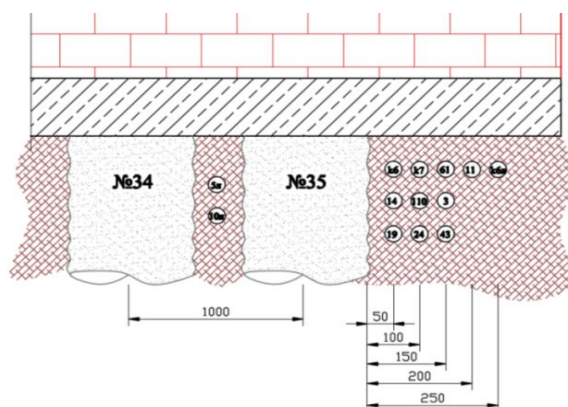


Рисунок 3.7 – Схема відбору ґрунтових зразків

Кількість зразків, відібраних в прилеглому до колон ґрунтовому масиві, складало 13 (рис. 3.7), ще 3 зразка було відібрано в природному (непорушеному) заляганні ґрунту для порівняння. На момент відбору кілець з ґрунтовим матеріалом колони № 34 і 35 мали вік 67 і 69 діб відповідно.

З огляду на те, що колони струменевої цементації виконувалися в ґрунті з заторфованими прошарками, в навколишньому ґрунтовому масиві спостерігалися прошарки пульпи товщиною 20–30 см (рис. 3.9). Такі прошарки послужили додатковим армуванням ґрунту і для визначення впливу їх утворення на ґрунт були відібрані додаткові 4 ґрунтових кільця на відстані 5 і 10 см вище і нижче прошарку (рис. 3.8).



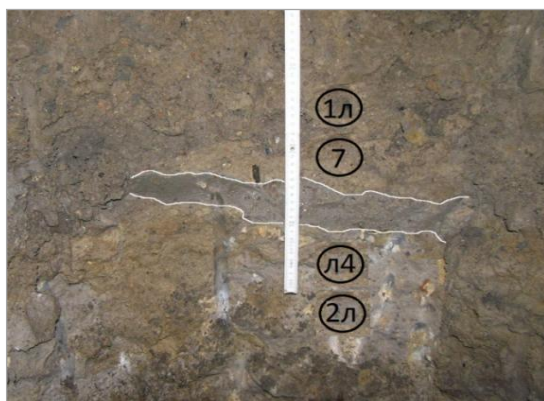


Рисунок 3.8 – Вихід пульпи в ґрунт (насипний ґрунт) на відстані 1,5 м від колони



Рисунок 3.9 – Прошарок пульпи над залізобетонною плитою

В якості визначального чинника для порівняння змін в ґрунтовому масиві було обрано значення щільності, для кількох відібраних зразків були також визначені зчеплення і кут внутрішнього тертя. Результати лабораторних випробувань ґрунтів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізико–механічні властивості відібраних зразків ґрунту

Розташування зразків зверху–вниз	Номер проби*	Відстань від поверхні колони, мм	Щільність, т/м <sup>3</sup>	Вологість	Питоме зчеплення, МПа	Кут внутрішнього тертя, град
			$\gamma$	$W$	$c$	$\varphi$
1–й ряд	кб	50	1,81	0,333		
	7	100	1,87	0,310	0,038	8
	61	150	1,96	0,352	0,028	16
	11	200	1,89	0,420		
	кбл	250	1,83	0,392		
2–й ряд	14	50	1,71	0,399		
	110	100	1,73	0,860	0,020	19
	3	150	1,80	0,398		
3–й ряд	19	50	1,73	0,424		
	24	100	1,74	0,350	0,026	10
	43	150	1,75	0,369		
Між колонами №34 и 35	5л	45	1,84	0,357		
	10л	45	1,82	0,358		
В області розташування пульпи	7	вгору на 50	1,58	0,246		
	1л	вгору на 100	1,56	0,244		
	л4	вниз на 50	1,58	0,221		
	2л	вниз на 100	1,49	0,276		

розташування зразків вказано на рисунках 3.7 і 3.8

За даними лабораторних випробувань зразків непорушеної структури в природному заляганні щільність дорівнює 1,66, 1,68 і 1,72 т/м<sup>3</sup> відповідно для 1, 2 і 3 зразків, вологість – 0,500, 0,481 і 0,505, кут внутрішнього тертя був визначений тільки для 1-го і дорівнював 6°, зчеплення 0,019 МПа (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Фізико-механічні характеристики зразків ґрунту непорушеної структури

Розташування зразків зверху–вниз	Номер проби*	Відстань від поверхні колони, мм	Щільність, т/м <sup>3</sup>	Вологість	Питоме зчеплення, МПа	Кут внутрішнього тертя, град
			$\gamma$			
Зразок непорушеної структури	1	–	1,66	0,500	0,019	6
	2	–	1,68	0,481	–	–
	3	–	1,72	0,505	–	–

Графічно результати дослідження розподілу щільності ґрунтових зразків в залежності від відстані від поверхні колон струменевого ін'єктування показані на рисунку 3.10.

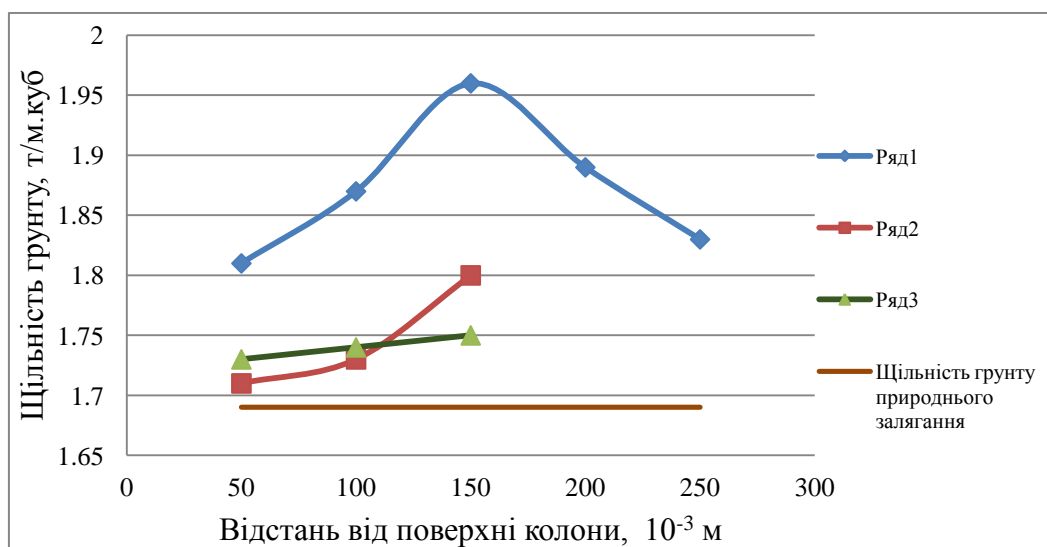


Рисунок 3.10 – Залежність зміни щільності ґрунту між ґрунтоцементними колонами від відстані до поверхні колони

На графіку спостерігається наступний розподіл щільності зі зміною відстані від поверхні колони: в зоні 0–150 мм від поверхні колони відбувається розущільнення ґрунту в процесі, коли ґрунтоцементний матеріал знаходиться в рідкому стані; 150 мм – максимальна межа впливу струменя розчину під час

формування колони (отримані максимальні значення зміни фізико-механічних характеристик ґрунтових зразків); на відстані 150–250 мм визначається зона зниження впливу високонапірного струменя на щільність ґрунту (це характерно для 1-го ряду).

Сам процес формування виділених зон полягає в наступному: при проходженні високонапірного струменя цементного розчину в ґрунті утворюється циліндричний елемент, заповнений ґрунтоцементною сумішшю, велика частина енергії струменя витрачається на руйнування і перемішування ґрунту. На межі утвореного елемента потужність струменя падає, але він ще здійснює деякий тиск на ґрунтовий масив, відбувається ущільнення навколишнього ґрунту на певну максимальну відстань впливу. Після формування струменево-цементацийного елемента і знаходженні його в рідкому стані формується зона розущільненого ґрунту на деякій відстані від поверхні колони до максимальної відстані дії струменя на ґрунтовий масив. Слідом за межею максимального впливу відбувається поступове зниження щільності до його початкових значень.

Слід зазначити, що дане явище спостерігається лише на досліджуваній ділянці в заторфованому суглинку.

При порівнянні значень щільності ґрунту природного залягання і ґрунту з зон впливу високонапірного струменя можна зробити наступні висновки:

- в зоні розущільнення ґрунту щільність суглинку в порівнянні з її максимальними значеннями знижується на 2...8%, відповідно з 1,96 до 1,81 т/м<sup>3</sup> і з 1,75 до 1,73 т/м<sup>3</sup> для 1-го і 3-го рядів відібраних ґрунтових зразків;
- у порівнянні із середнім значенням щільності суглинку з домішками органічних речовин в природному заляганні (1,69 т/м<sup>3</sup>) максимальне збільшення щільності ґрунту після впливу на нього високонапірного струменя склало 16 % (1,96 т/м<sup>3</sup>); мінімальне – 4 % (1,75 т/м<sup>3</sup>);

- щільність ґрунту, що знаходиться між двома виконаними колонами, збільшилася на 9 % в порівнянні з середнім значення щільності при природному заляганні (з 1,69 до 1,84 т/м<sup>3</sup>);
- пульпа, витісняючи слабкі заторфовані прошарки ґрунту, ущільнила на 6 % навколишній масив насипного шару на відстані 50 мм в порівнянні з ґрунтом, розташованим в розглянутій площині на відстані 100 мм (з 1,49 до 1,58 т/м<sup>3</sup>);

#### Дослідження зразків ґрунтоцементного матеріалу колон

Для визначення міцності на стиск матеріалу ґрунтоцементної колони в її поперечному перерізі відібрані зразки для випробувань. На момент відбору кернів колони мали вік 67 і 69 діб. Відбір виконувався за допомогою установки Hilti. Діаметр керна становив 104 мм.

Зразки з відібраного керна (рис. 3.11, 3.12) були випробувані в Центральній лабораторії скельних ґрунтів підприємства "Північгеологія" м. Києва. Результати занесені в таблицю 3.3.



Рисунок 3.11 – Бурова машина для свердління бетону Hilti



Рисунок 3.12 – Відбір кернів з колони

Таблиця 3.3 – Результати значень міцності на стиск дослідних зразків ґрунтоцементу

№ зразка*	Середня щільність, г/см <sup>3</sup>	Пористість, %	Міцність на стиск, МПа
1	2,64	54,34	3,7
2	2,66	52,26	6,5
3	2,66	53,38	6,7

\* Номер зразка відповідає номеру на рис. 3.13

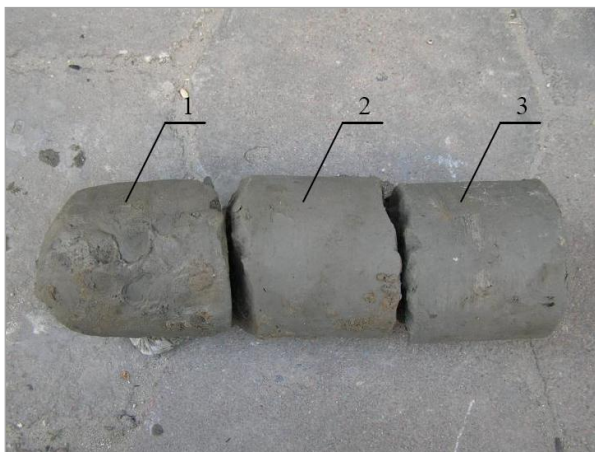


Рисунок 3.13 – Відібраний kern  $\varnothing 104$  мм, довжиною 320 мм  
(зліва-направо напрямом від краю до центру колони)

Лінзи пульпи, виявлені в оточуючому колони ґрунті з різним ступенем заторфованості в свою чергу створили ефект "ін'єкції ґрунтів" і послужили додатковим фактором покращення структури основи фундаментів.

При виконанні підсилення фундаментів методом струменевої цементації не було відзначено додаткових деформацій будівлі внаслідок роботи бурової машини.

### ***Реконструкція будівлі ресторану «Лейпциг» в м. Києві (лесові суніски)***

Досліджувана ґрунтова основа – основа реконструйованої будівлі – ресторану «Лейпциг» на перетині вул. Володимирської та Прорізної. Будівлю (колишній прибутковий будинок) побудовано в 1900 р. (рис. 3.14, 3.15). Будівля і фундаменти цегляні. У зв'язку з різницею відміток рельєфу будівля має різну поверховість (5–6 поверхів). Під усім будинком розташовані підвали. З 1989 р. будівля не експлуатується. При обстеженні стану конструкцій будівлі відзначені поздовжні і поперечні тріщини з максимальним розкриттям до 10–30 мм в несучих стінах.





Рисунок 3.14 – Будівля, що реконструюється



Рисунок 3.15 – Виконання колон

В геоморфологічному відношенні досліджена ділянка розташована на схилі корінного лесового плато, що знижується в напрямку Хрещатицької балки. Геологічна будова представлена насипними ґрунтами (супісок з включенням будівельного сміття) потужністю 1–3 м, супіском лесоподібним, потужністю 6–13 м, бурою глиною – 8–9 м; бурою неоднорідною глиною до 2.5 м, глиною і піском полтавської світи. Підземні води розкриті на глибинах 9–11,6 м в межах абсолютних відміток 167.61–173.97 м. Водовмісними є моренні суглинки з прошарками піску. Водопором служить глина бура і строката.

Проект підсилення фундаментів будівлі "Лейпциг", що реконструюється, був розроблений і виконаний в 2004 році. Згідно з проектом під усіма несучими стінами будівлі по обидва боки цегляного фундаменту струменевим ін'єктуванням виконані колони діаметром 600 мм, під кутом  $3^\circ$ , довжиною 13,0 м і з кроком від 1,2 до 2,4 м (рис. 3.16, 3.17).



Рисунок 3.16 – Виконана колона

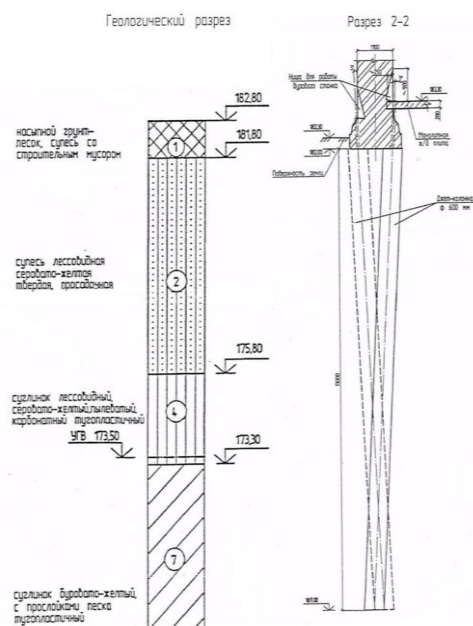


Рисунок 3.17 – Схема підсилення

### Дослідження зразків ґрунту в міжколонному просторі

В кінці 2010 року НДІБК провели роботи з визначення несучої здатності конструкції «джет-колон» (колони струменевого ін'єктування) і дослідження матеріалу, відібраного з тіла колон і навколишнього ґрунтового масиву.

З внутрішнього двору будівлі розкриті 3 струменево-цементацийні колони (№ 166, 167, 168). У просторі між №167 і №166 були відібрані 20 кільцевих зразків ґрунту (рис. 3.18).

Кільця для відбору зразків ґрунту розташовувалися на відстані:

- 1 і 5 – 50 мм від поверхні колони;
- 2 і 4 – 225 мм;
- 3 – 450 мм.

Зразки, відібрані з позицій 2 і 4 (225 і 450 мм від поверхні колони) не мали суттєвих відмінностей між собою. Характеристики зразків 1 і 5 (50 мм від поверхні колони) показали зміни в бік покращення в порівнянні із зразками 2 і 4.

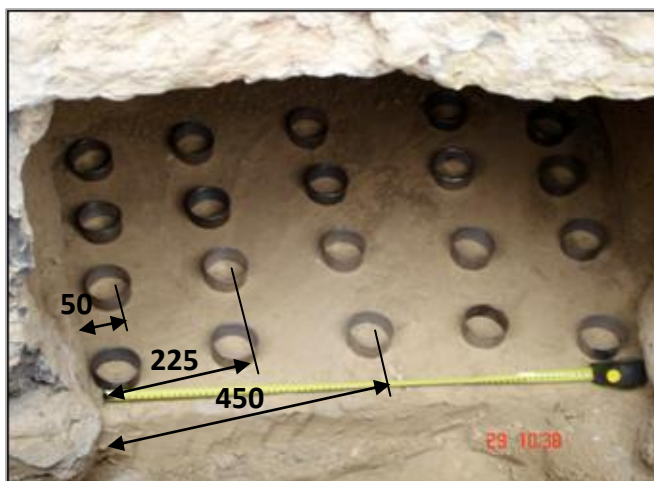


Рисунок 3.18 – Схема відбору проб ґрунту

Досліджуваний ґрунт – супісок лесоподібний, світло-коричневий, легкий пілуватий, в водонасиченому стані текучий, макропористий, просідний. Результати лабораторних досліджень занесено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати лабораторних досліджень

	<i>ІГЕ-2 (2 та 4)</i>	<i>ІГЕ-2* (1 та 5)</i>
Природна вологість	$W = 0,12$	$W = 0,135$
Вологість на границі текучості	$W_L = 0,24$	$W_L = 0,28$
Вологість на границі розкочування	$W_P = 0,20$	$W_P = 0,21$
Число пластичності	$I_P = 0,04$	$I_P = 0,075$
Показник текучості	$I_L < 0$	$I_L < 0$
Показник текучості при коеф. водонас.	$S_r = 0,9, I_L > 1$	$S_r = 0,9, I_L > 1$
Щільність часток ґрунту	$\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$	$\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$
Щільність ґрунту	$\rho = 1,52 \text{ г/см}^3$	$\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$
Щільність сухого ґрунту	$\rho_d = 1,36 \text{ г/см}^3$	$\rho_d = 1,355 \text{ г/см}^3$
Коефіцієнт пористості	$e = 0,96$	$e = 0,96$
Коефіцієнт водонасичення	$S_r = 0,33$	$S_r = 0,37$
Початковий тиск просідання	$\rho_{sl} = 86 \text{ кПа}$	$\rho_{sl} = 175 \text{ кПа}$
Кут внутрішнього тертя	$\varphi_{II} = 26,5^\circ$	$\varphi_{II} = 29,5^\circ$ ;
Питоме зчеплення	$C_{II} = 7,5 \text{ кПа}$	$C_{II} = 8,5 \text{ кПа}$
Кут внутрішнього тертя	$\varphi_I = 23,5^\circ$	$\varphi_I = 26^\circ$
Питоме зчеплення	$C_I = 5 \text{ кПа}$	$C_I = 5,5 \text{ кПа}$
Модуль деформації ґрунту в природному стані	$E = 4 \text{ МПа}$	$E = 6 \text{ МПа}$
Модуль деформації ґрунту в водонасич. стані	$E = 3 \text{ МПа}$	$E = 5 \text{ МПа}$



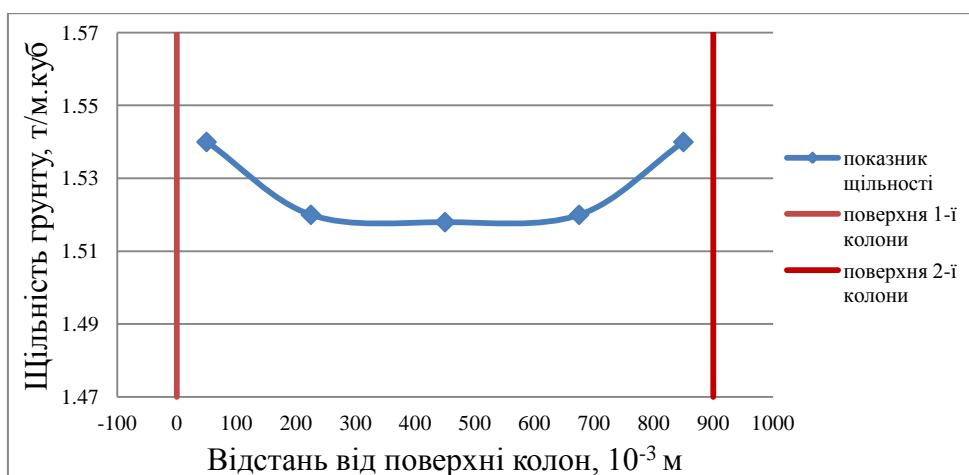


Рисунок 3.19 – Графік зміни щільності ґрунту з відстанню від поверхні колон

Необхідно зазначити, що час між виконанням колон струменевою цементациєю і проведенням досліджень ґрунтів становить 6 років, отже, інженерно-геологічні дані часу виконання підсилення основи не розглядались. Всі порівняння характеристик зроблено тільки між отриманими зразками в міжколонному просторі.

Висновки за отриманими результатами:

- максимальна зона впливу на навколишній ґрунтовий масив – 10 см;
- ґрунт зразків 1 і 5 – супісок (ІГЕ-2, число пластичності  $I_p = 0,04$ ) набув деяких властивостей глинистого ґрунту, тобто перейшов в легкий пілуватий суглинок (ІГЕ-2\*, число пластичності  $I_p = 0,075$ );
- питоме зчеплення збільшилось на 12 % (8,5 кПа для зразків 1 і 5 і 7,5 кПа для зразків 2 і 4);
- кут внутрішнього тертя збільшився на 10 % ( $26^\circ$  і  $23,5^\circ$ );
- модуль деформації ґрунту збільшився на 33 % (6 МПа для зразків ІГЕ-2 – 1 і 5, 4 МПа для ІГЕ-2\* – 2 і 4);
- помітно знизились значення показників просідання ґрунту – початковий просадний тиск збільшився з  $p_{sl} = 86$  кПа до  $p_{sl} = 175$  кПа.

#### Дослідження зразків ґрунтоцементного матеріалу колон.

Ґрунтоцементні колони (рис. 3.20, 3.21) обрізані в площині стіни внаслідок будівельних робіт, що виконувались на прилеглій території.



Рисунок 3.20 – Загальний вигляд колон на ділянці обстеження

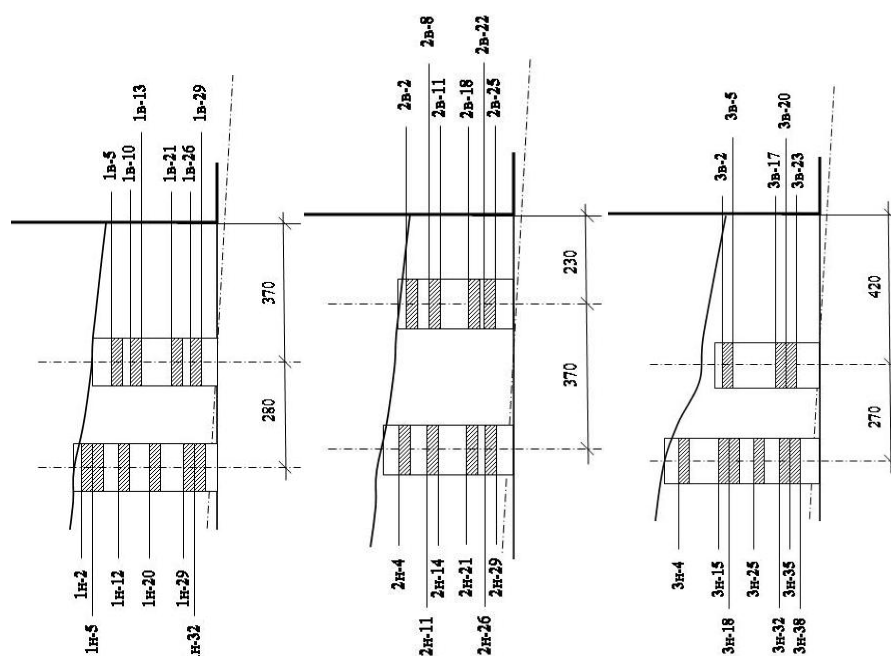


Рисунок 3.21 – Схема розміщення кернів та зразків  
(колони №168, №167, №166)

Міцність матеріалу ґрунтоцементних колон визначалась методом ударного імпульсу, який відноситься до неруйнівних методів контролю міцності, згідно з ДСТУ Б.В.2.7–220:2009. Дослідження виконувалося за допомогою приладу ОНИКС–2.

Визначення міцності бетону виконувалося двопараметричним методом: одночасно по ударному імпульсу та пружному відскоку, що істотно підвищує вірогідність вимірювань. Результат формувався після нанесення на контрольній

ділянці конструкції серії до 6-ти ударів з одержанням до 12-ти первинних результатів (по ударному імпульсі та відскоку) шляхом їхньої подальшої обробки й обчисленням коефіцієнта варіації. Результати визначення міцності матеріалу ґрунтоцементних колон наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати визначення міцності матеріалу

№№ «джет- колон»	№№ кернів	Площина визначення міцності	Міцність матеріалу, R, МПа	Середнє значення міцності матеріалу, R <sub>ср</sub> , МПа
1	2	3	4	5
168	1В	1В-5	5,9; 5,0; 5,9; 5,4; 5,8; 6,1	5,6
		1В-10	5,2; 5,2; 5,2; 6,1; 5,1; 5,2	5,3
		1В-13	5,9; 4,0; 4,6; 3,8; 6,0; 5,2	4,9
		1В-21	6,4; 3,6; 3,9; 5,3; 5,3; 5,4	4,9
		1В-26	4,9; 5,2; 5,1; 5,5; 4,7; 5,1	5,0
		1В-29	5,5; 4,9; 6,0; 5,4; 4,7; 4,7	5,2
	1Н	1Н-2	6,9; 7,4; 5,6; 6,4; 6,0; 6,8	6,5
		1Н-5	6,6; 6,4; 6,1; 4,5; 6,7; 7,2	6,2
		1Н-12	6,7; 7,6; 5,7; 6,2; 4,6; 7,2	6,3
		1Н-20	7,4; 7,7; 5,7; 7,4; 6,7; 6,9	6,9
		1Н-29	6,2; 5,7; 6,3; 6,6; 6,4; 5,6	6,1
		1Н-32	7,1; 6,1; 6,7; 7,4; 5,2; 6,0	6,4
167	2В	2В-2	3,7; 5,3; 4,8; 4,9; 4,6; 4,6	4,6
		2В-8	5,0; 5,2; 4,1; 3,2; 4,4; 8,6	4,3
		2В-11	6,0; 4,9; 5,4; 4,5; 5,1; 3,9	4,9
		2В-18	3,8; 7,0; 7,5; 6,5; 7,2; 6,9	7,0
		2В-22	10,6; 10,8; 9,0; 9,7; 9,8; 8,9	9,8
		2В-25	11,6; 14,2; 11,2; 14,6; 13,4; 9,0	12,3
	2Н	2Н-4	17,8; 12,9; 12,2; 10,0; 17,1; 9,2	11,0
		2Н-11	6,4; 6,7; 5,9; 6,7; 5,5; 6,4	6,2
		2Н-14	4,9; 6,2; 5,2; 6,6; 4,4; 5,1	5,4
		2Н-21	4,6; 5,4; 4,3; 4,5; 4,8; 5,5	4,8
		2Н-26	4,5; 4,4; 5,0; 5,2; 3,3; 3,0	4,2
		2Н-29	3,4; 5,7; 4,3; 3,3; 4,0; 3,1	3,6
166	3В	3В-2	6,3; 6,6; 5,1; 6,5; 4,5; 5,7	5,7
		3В-5	5,6; 5,3; 5,9; 6,1; 6,6; 5,4	5,8
		3В-17	5,4; 4,2; 5,1; 4,3; 4,9; 4,2	4,6
		3В-20	5,2; 4,1; 4,9; 4,2; 3,2; 4,1	4,2
		3В-23	4,3; 5,7; 5,1; 4,1; 3,9; 4,3	4,5
	3Н	3Н-4	6,6; 10,7; 10,3; 8,2; 9,9; 7,4	8,8
		3Н-15	6,7; 4,3; 4,6; 5,8; 6,6; 4,7	5,4
		3Н-18	5,3; 5,8; 5,4; 4,1; 4,1; 3,6	4,7
		3Н-25	4,5; 4,6; 5,0; 4,9; 4,7; 4,3	4,6
		3Н-32	5,2; 5,1; 5,0; 5,5; 4,6; 4,7	5,0
		3Н-35	5,5; 5,1; 4,6; 4,8; 4,7; 4,5	4,8
		3Н-38	4,7; 4,1; 4,1; 4,5; 4,3; 4,5	4,3

За результатами випробувань міцність матеріалу колон на ділянці підсилення будинку, що визначена методом ударного імпульсу:

- по колоні № 168 (кern 1в) знаходиться в межах  $4,9 \div 5,6$  МПа;
- по колоні № 168 (кern 1н) знаходиться в межах  $6,1 \div 6,9$  МПа;
- по колоні № 167 (кern 2в) знаходиться в межах  $4,3 \div 12,3$  МПа;
- по колоні № 167 (кern 2н) знаходиться в межах  $3,6 \div 11,0$  МПа;
- по колоні № 166 (кern 3в) знаходиться в межах  $4,2 \div 5,8$  МПа;
- по колоні № 166 (кern 3н) знаходиться в межах  $4,3 \div 8,8$  МПа.

### ***Реконструкція пам'ятника архітектури Андріївська церква в м. Києві (супіски)***

Андріївська церква – пам'ятка архітектури XVIII ст., що побудована у 1747–1762 рр. І. Ф. Мічуріним за проектом італійського архітектора Ф.–Б. Растреллі. З 1968 р. Андріївська церква – музей, філіал Національного заповідника "Софія Київська" (рис. 3.22).

З кінця 2008 року СП "Основа–Солсиф" почала розробку документації з протиаварійних та ремонтно-реставраційних робіт, що включали в себе закріплення пагорбу, підсилення фундаментів будівлі та реставраційні роботи церкви та оточуючих елементів.

Церква зведена на залишках земляної фортеці XVI ст. і стоїть на 14–ти метровому фундаменті-стилобаті, котрий являє собою двоповерхову будівлю. Розміри церкви: довжина – 32 м, ширина – 20 м, висота від тераси до вершини хреста та центрального купола – 50 м. Фундамент являє собою цегляну кладку потужністю від 3 до 5 метрів.

Ґрунтами основи фундаментів південного, західного та північного фасадів служать еолово-делювіальні лесові супіски, які мають просадні властивості. Основою фундаментів східного фасаду слугують моренні суглинки (рис. 3.24).

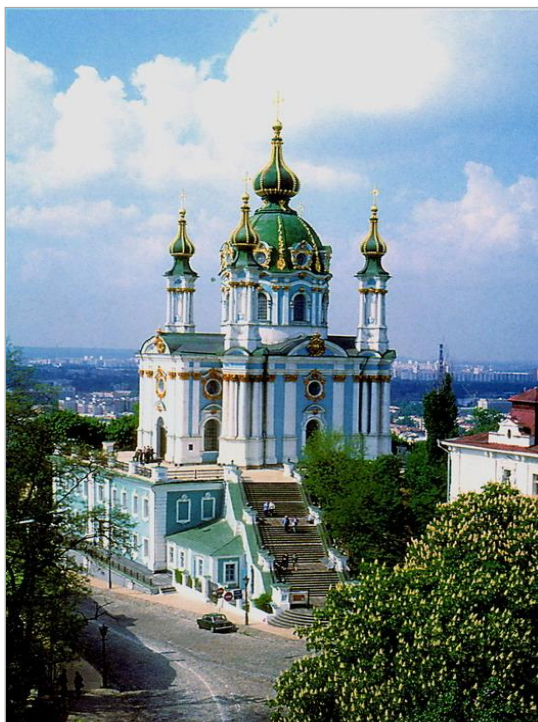


Рисунок 3.22 – Андріївська церков

При візуальному обстеженні будівлі Андріївської церкви та її двоповерхової стилобатної частини зафіксовані пошкодження окремих ділянок фундаментів та стін стилобату, тріщини з шириною розкриття до 2.0 мм і довжиною до 6 м, тріщини в фундаментах та перекриттях, нахили та випирання стін фундаментів, вивітрювання кладки стилобату. Технічний стан основ та фундаментів за класифікаційною таблицею Нормативних документів з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд характеризувався для основ, фундаментів та несучих конструкцій як непридатний до нормальної експлуатації.

За осіданням фундаментів церкви велися спостереження починаючи з 1987 р. і впродовж усього періоду робіт з закріплення пагорбу і підсилення фундаментів церкви.

Середнє осідання будівлі церкви, зафіксоване від початку проведення будівельних робіт з укріплення пагорбу навколо церкви становить – 6,0 мм, найбільше – 6,9 мм (південний фасад церкви), найменше – 5,5 мм (північно–західна частина). Аналіз середніх осідань за 22 роки до початку будівельних робіт показав, що середнє осідання будівлі церкви становило – 3,3 мм, а за 16

місяців проведення будівництва склало – 6,0 мм. При цьому значні осідання (4,0 мм) припадають на початок виконання робіт (осінь, 2010 р.) Останні місяці спостережень характеризувалися затухаючим характером та стабілізацією деформацій (рис. 3.23).

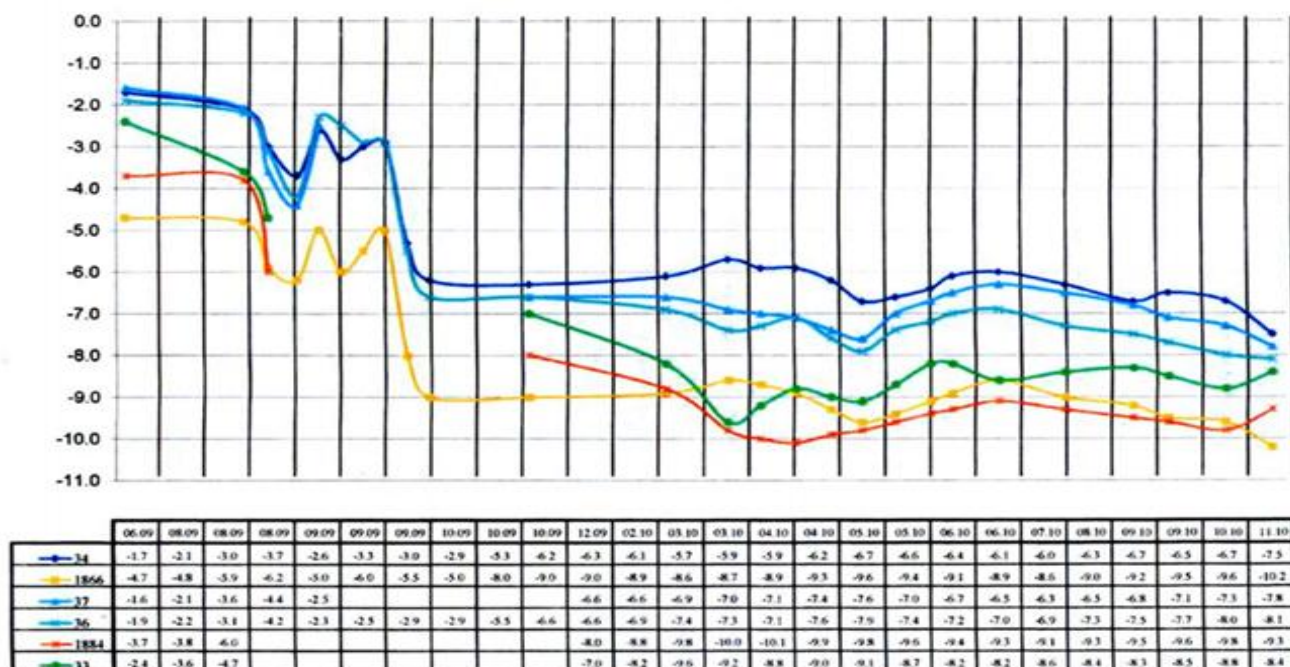


Рисунок 3.23 – Процес стабілізації осідань

Проектне рішення з підсилення фундаментів Андріївської церкви розроблено в 2009 році та представляло собою виконання джет-колон в основі з середини підпапертного приміщення, із зовнішньої сторони стилобату та з середини приміщень церкви та стилобату загальною кількістю 259 штук, довжиною від 10,8 до 13,5 м з кутами нахилу від 7° до 13° та діаметром 600 мм з розширенням 800 мм, крок 1,0–2,7 м. Принципову схему підсилення фундаментів церкви показано на рисунку 3.24.

На рисунках 3.25, 3.26 наведені фотофіксація процесу виконання колон підсилення.



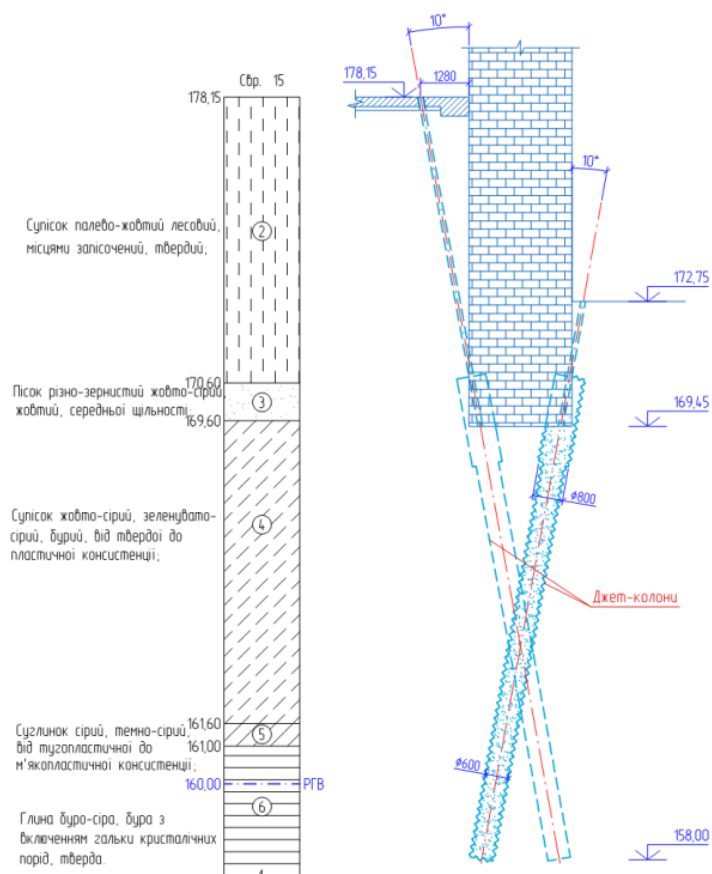


Рисунок 3.24 – Схема підсилення фундаментів та геологічні умови майданчика (північно-східна частина Андріївської церкви)

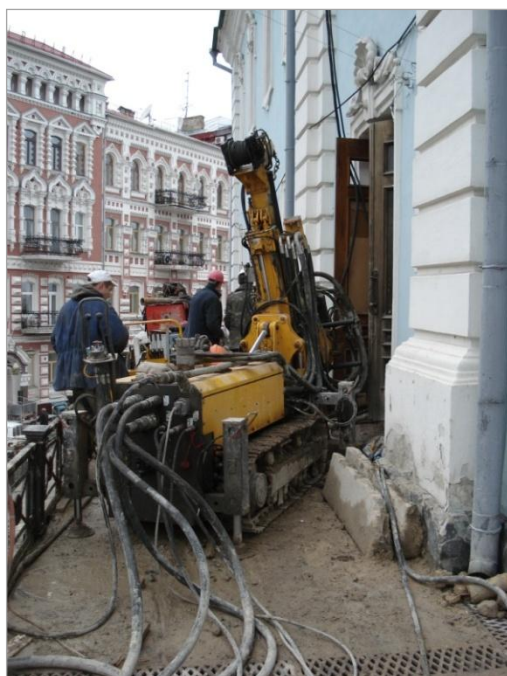


Рисунок 3.25 – Виконання колон струменевого ін'єктування



Рисунок 3.26 – Колони струменевого ін'єктування

### Дослідження зразків ґрунту в міжколонному просторі

В червні 2010 р. відібрано ґрунтові зразки між трьома колонами струменевого ін'єктування та зразок непорушеної структури для визначення зони впливу струменево-цементацийних елементів на оточуючий ґрунтовий масив (супісок пилуватий) та проведені дослідження в Геотехнічній лабораторії СП "Основа–Солсиф". Результати наведено у таблиці 3.6 та на рисунку 3.27.

Таблиця 3.6 – Фізико-механічні властивості відібраних зразків ґрунту

Розташування зразків (глибина, м)	Номер зразку*	Відстань від поверхні колони, мм	Щільність вологого ґрунту, т/м <sup>3</sup>	Вологість, д.о. <i>W</i>	Щільність сухого ґрунту, т/м <sup>3</sup>
			$\gamma$		$\gamma_d$
2,2	1	100 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,47
	2	200 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,47
	3	300 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,47
	4	400 (від 1-ї до 2-ї)	1,64	0,130	1,45
	5	700 (від 1-ї до 2-ї)	1,67	0,138	1,47
	6	800 (100 від пов-ні 2-ї)	1,67	0,147	1,46
2,5	7	60 (від 2-ї до 3-ї)	1,68	0,141	1,47
	8	60 (від 3-ї)	1,69	0,152	1,47
	9	60 (від 3-ї)	1,72	0,133	1,52
Зразок непорушеної структури	10		1,60	0,130	1,42

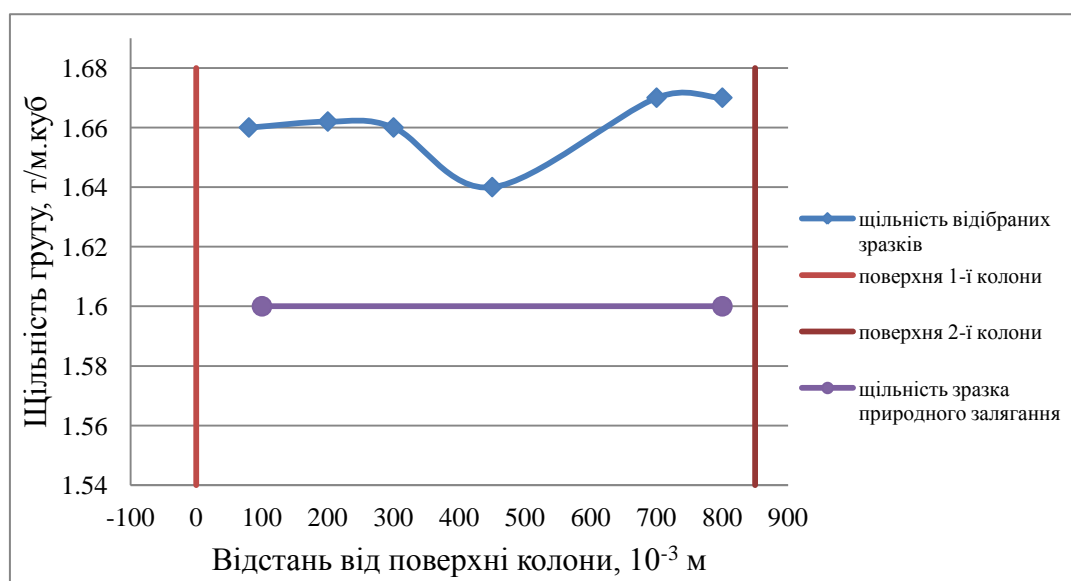


Рисунок 3.27 – Зміна значень щільності вологого ґрунту між двома колонами струменевого ін'єктування



Грунтуючись на отриманих результатах, можна зробити такі висновки:

- на відстані 100 і 150 мм від поверхні 1-ї і 2-ї колон при інженерно–геологічних вишукуваннях відзначено зростання щільності на 4 і 5 % відповідно. При відборі зразків на відстані 60 мм від поверхні 3-ї колони було виміряне збільшення щільності на 5 і 8 % (по обидві сторони від колони);
- при усередненні отриманих значень щільності ґрунтових зразків в міжколонному просторі простежується ущільнення ґрунту на 1...7 %. Коефіцієнт відносного ущільнення у всьому міжколонному ґрунтовому просторі дорівнює 1,03;
- зони максимального впливу на навколишній ґрунтовий масив поширюються на 15 і 30 см відповідно від поверхні другої і першої ґрунтоцементної колони.

#### Дослідження зразків ґрунтоцементного матеріалу колон

В кінці 2010 року ДП НДІБК була проведена технічно–наукова робота з інструментального дослідження міцнісних характеристик матеріалів будівлі і струменево-цементацийних підсилюючих елементів.



Рисунок 3.28 – Відбір зразків з ґрунтоцементних колон

Неруйнівний метод реалізувався за допомогою приладу "ОНИКС–2.5".

З колон №229 та 228 були відібрані два керни (рис. 3.28). Результати випробувань ґрунтоцементного матеріалу показали, що міцність на одноосний стиск варіювалися від 10,2 до 14,3 МПа.

***Підсилення основи при реконструкції приміщення з навісом в станцію з виробництва продуктів розділення повітря з установкою ВРУ–1400 в м. Єнакієве (техногенні ґрунти – шлаки доменного виробництва)***

Причиною виконання робіт щодо підсилення ґрунтової основи при реконструкції приміщення з навісом в станцію з виробництва продуктів розділення повітря з установкою ВРУ–1400 в м. Єнакієве була невідповідність інженерно-геологічних умов будівельного майданчика раніше виконаним дослідженням. При проведенні додаткових інженерно-геологічних вишукувань на стадії розробки робочої документації фундаментів споруд станції виявлено, що в товщі насипних ґрунтів присутні не ущільнені зони різної потужності на різних глибинах.

Для зміцнення основи фундаментів і покращення будівельних властивостей ґрунтів розроблено проєкт підсилення основи ґрунтоцементними палями (колонами) діаметром 600 мм, глибиною 10 м, виконаних за технологією струменевої цементації. При цьому необхідна міцність на стиск матеріалу ґрунтоцементних колон проєктною документацією встановлена на рівні не менше 2,5 МПа (рис. 3.29, 3.30).

Відповідно до програми випробувань ґрунтоцементних паль на майданчику будівництва ВРУ–1400, для контролю якості виконаних колон СП "Основа–Солсиф" виконано дві експериментальні колони довжиною 10 м. Дослідні колони виконано з метою підтвердження правильності обраних технологічних параметрів технології в фактичних інженерно-геологічних умовах будівельного майданчика і контролю отримання необхідних геометричних і міцнісних параметрів.

Фізико-механічні характеристики ґрунтів наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ n/n	Показники фізико-механічних властивостей	Од. вимір.	ІГЕ-1	ІГЕ-2	ІГЕ-4	ІГЕ-5	ІГЕ-6	ІГЕ-7	ІГЕ-8
1	Питома вага, $\gamma$ " <u>природний стан</u> водонас. стан	кН/м <sup>3</sup>	$\frac{18,55}{20,55}$	20,02	20,01	19,58	19,85	20,92	24,55
2	Питоме зчеплення, $c$ " в водонас. стані	МПа	0,002	–	0,028	0,020	0,036	0,027	–
3	Кут вн. тертя, $\varphi$ " в водонас. стані	град	36	–	16	15	13	18	–
4	Модуль деформації, $E$ <u>природний стан</u> водонас. стан	МПа	$\frac{14,9}{14,2}$	–	20,0	14,0	24,0	19,0	–

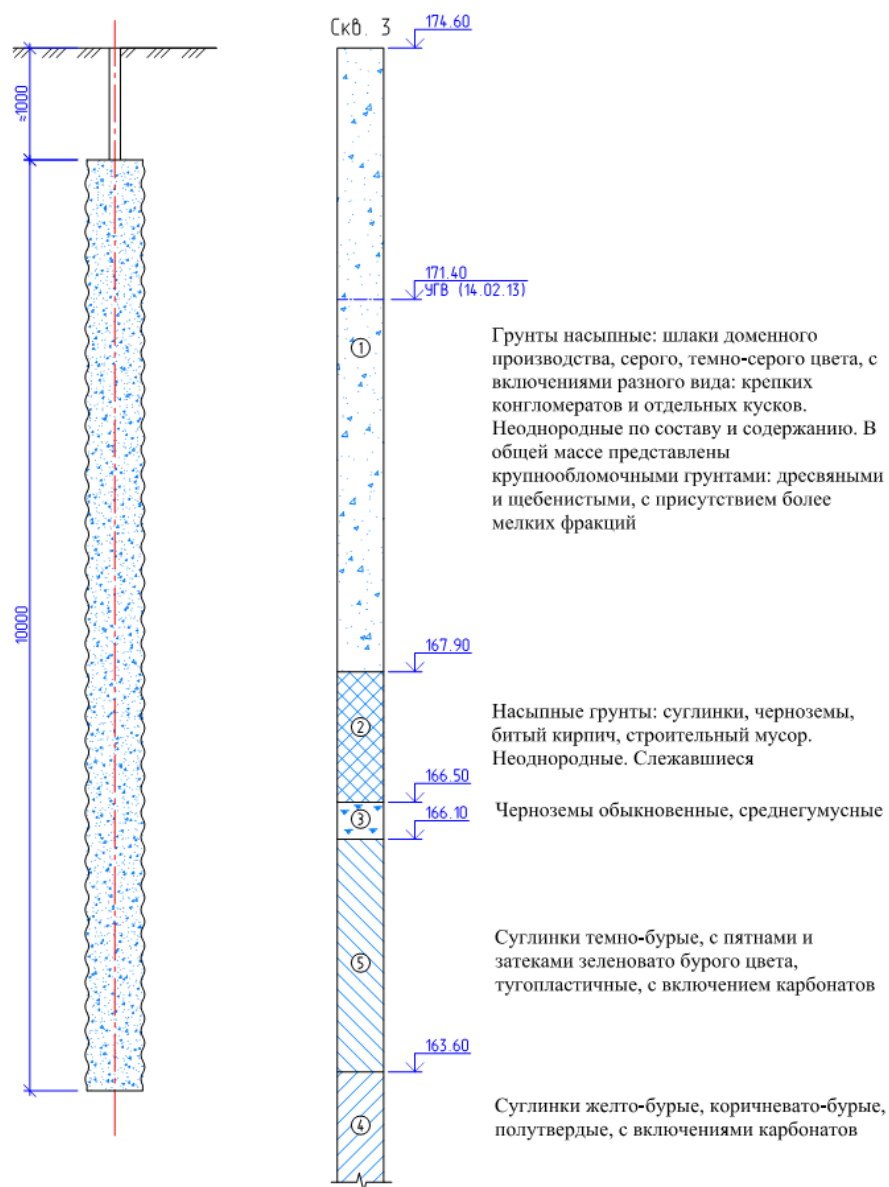


Рисунок 3.29 – Ґрунтоцементна колона та інженерно-геологічна колонка



Рисунок 3.30 – Виконання дослідних колон буровою установкою Casagrande C6

Грунтові води зустрінуті на глибинах 2,3 м ... 4,8 м від поверхні землі (абсолютні позначки – 169,80 м...172,20 м) у відкладеннях ґрунтів шару 1 (шлаки насипні) і є водами техногенного походження. Територія оцінюється як підтоплена.

Дослідні ґрунтоцементні колони Дж-1 і Дж-2 виконані 01.07.2013 р.

У зв'язку з наявністю в насипних шлаках доменного виробництва зон з різним ступенем ущільнення і підвищеної пористості за фактом виконання робіт вихід пульпи на поверхню ґрунту зафіксовано в меншому обсязі, ніж очікувалось. Даний факт обумовлений заповненням пульпою не ущільнених горизонтальних зон, оточуючих колону, і додаткового ущільнення ґрунтового масиву за рахунок залишкового тиску пульпи. Отриманий ефект, поряд з вертикально розташованими стовпами колон, можна охарактеризувати як додаткове армування основи горизонтальними лінзами ґрунтоцементної пульпи, що в підсумку призводить до отримання більш високих деформаційних характеристик основи.



Дослідження зразків ґрунтоцементного матеріалу колони

Для підтвердження заданих проектною документацією геометричних розмірів і суцільності ґрунтоцементного тіла колон проведено візуальні та інструментальні дослідження дослідних колон.

В процесі візуального обстеження встановлено, що дослідні ґрунтоцементні колони мають циліндричну форму, розривів суцільності тіла колон не спостерігається. Виміряні фактичні діаметри верхньої частини колон не менші встановлених проектом (600 мм) і складають для колони Дж-1 – 610 мм і для колони Дж-2 – 620 мм (рис. 3.31, 3.32). Отримані результати підтверджують правильність вибору технологічних параметрів високонапірного струменевого ін'єктування.



Рисунок 3.31 – Ґрунтоцементна колонна Дж-1



Рисунок 3.32 – Ґрунтоцементна колонна Дж-2

Для визначення міцності ґрунтоцементного матеріалу з тіла колони Дж-1 були відібрані горизонтальні керни на всю довжину діаметра. Керни відбирались за допомогою машини для свердління бетону Hilti DD 200 (рис. 3.33).

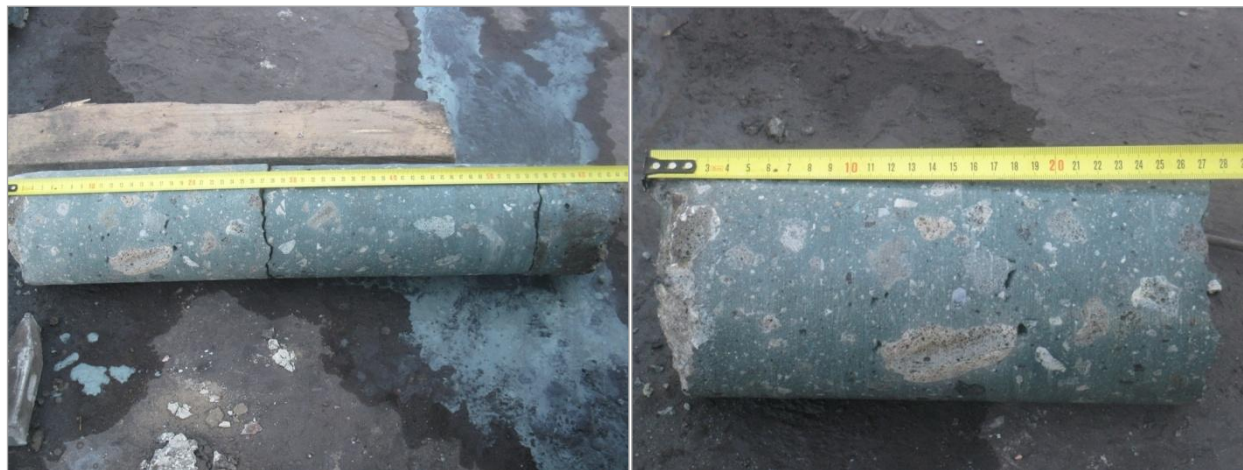


Рисунок 3.33 – Керн з колони Дж-1 (загальна довжина керна 640 мм)

З двох горизонтальних кернів відібрано 4 циліндричних зразка діаметром 120 мм і довжиною 240 мм для лабораторних випробувань матеріалу на міцність.

Три зразки (№1...3 в табл. 3.8) випробувані в лабораторії ТОВ "Донецький завод будівельних матеріалів" Астор "в Донецьку (рис. 3.34).

Випробування матеріалу на стиск було виконано за допомогою установки DIGIMAX Plus CONTROLS.



Рисунок 3.34 – Випробування ґрунтоцементного зразка на міцність

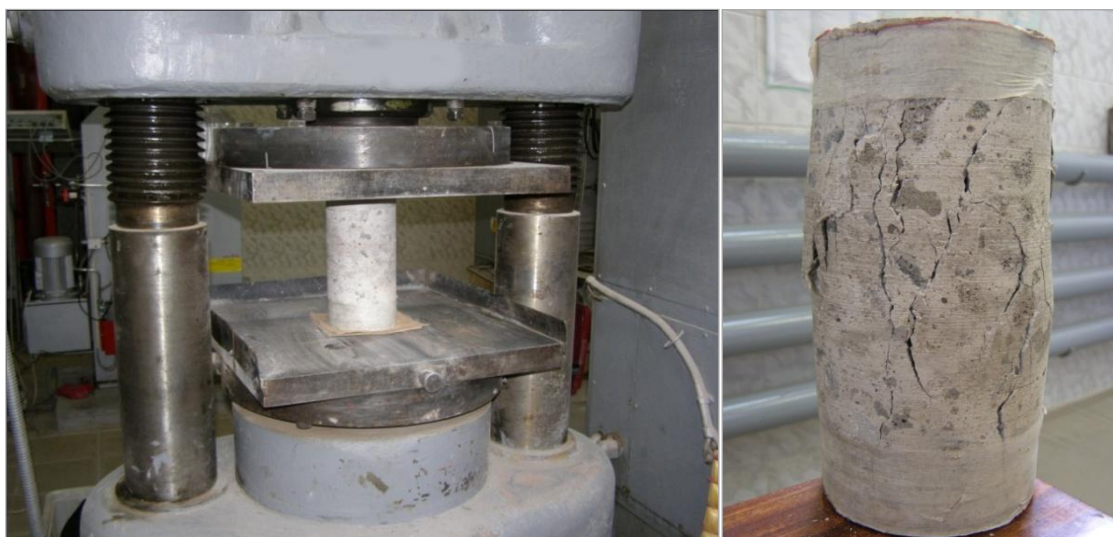


Рисунок 3.35 – Прес гідравлічний

Один циліндричний зразок (№4 у табл 3.8) був випробуваний в лабораторії СП "Основа–Солсиф" в м. Києві.

Таблиця 3.8 – Результати дослідження

<i>№, n/n</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Вік, діб.</i>	<i>Щільність зразка, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>Міцність, МПа</i>
1	Ґрунтоцементний матеріалі	24	1800	7,68
2	Ґрунтоцементний матеріалі	24	1755	4,76
3	Ґрунтоцементний матеріалі	24	1730	4,80
4	Ґрунтоцементний матеріалі	29	1730	7,96

Міцність цементно-шлакового матеріалу колони Дж-1 за результатами лабораторного випробування склала від 4,76 до 7,68 МПа для віку 24 діб і 7,96 МПа для 28 діб при необхідній міцності за проектом – 2,5 МПа.

Для контролю довжини і суцільності ствола струменево-цементацийного елементу, відповідно до програми випробувань, в джет–колоні Дж-2 на всю довжину відібрано вертикальний керн методом колонкового буріння (рис. 3.36, 3.37).





Рисунок 3.36 – Колона Дж-2 і відбір керна



Рисунок 3.37 – Частини керна, викладені по довжині колони

Відібрані керни по довжині колони (рис. 3.37) підтверджують суцільність тіла і відсутність розривів при обробці ґрунту високонапірним струменем цементного розчину. Ґрунтоцементна колона має довжину 10 м.

З частин вибуреного вертикального керна (позначені номерами на рисунку 3.37) відібрано зразки, що задовольняють вимогам випробування циліндричних зразків на стиск (довжина=2\*діаметр) і випробувані в будівельній лабораторії СП "Основа–Солсиф". Результати випробувань на



міцність зразків зведено в таблицю 3.9, де номер з/п відповідає номеру елементів на рисунку 3.37.

Таблиця 3.9 – Результати дослідження

<i>№, з/п</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Діапазон відбору, м</i>	<i>Вік, діб</i>	<i>Щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>Міцність, МПа</i>
3	Ґрунтоцементний матеріал	0–1	59	1610	8,2
5	Ґрунтоцементний матеріал	1–2	59	1510	8,2
7	Ґрунтоцементний матеріал	1–2	59	1770	8,9
9	Ґрунтоцементний матеріал	2–3	59	1520	9,5
13	Ґрунтоцементний матеріал	3–4	59	1490	11,2
17	Ґрунтоцементний матеріал	3–4	59	1595	7,4
18	Ґрунтоцементний матеріал	4–5	59	1605	7,3
22	Ґрунтоцементний матеріал	5–6	59	1660	7,9
26	Ґрунтоцементний матеріал	6–7	59	1490	11,0
27	Ґрунтоцементний матеріал	7–8	59	1570	9,5
28	Ґрунтоцементний матеріал	8–9	59	1540	7,3
32	Ґрунтоцементний матеріал	9–10	59	1525	10,8

Мінімальна міцність цементно-шлакового матеріалу за результатами лабораторного випробування склала 7,3 МПа, максимальна – 11,2 МПа. Для цементно-глинистого матеріалу: мінімальна – 7,3 МПа, максимальна – 10,8 МПа.

### 3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень

#### *Порівняння експериментальних даних відібраних ґрунтових зразків*

Не дивлячись на припущення Канематцу [82], що застосування струменевої цементації не впливає на напружено-деформований стан в ґрунті за межами радіуса впливу, на основі результатів випробування на трьох будівельних об'єктах, виконаних на території України, де застосовувалися струменево-цементаційні елементи, доведено зворотне.

Результати змін фізико-механічних характеристик ґрунтових зразків, відібраних з області навколо виконаного ґрунтоцементного елемента, занесені в порівняльну таблицю (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Порівняння характеристик ґрунтових зразків з різних об'єктів

№, n/n	Тип ґрунту		Фізико-механічні характеристики ґрунту та їх зміна				Визначена зона впливу
			$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	с, кПа	$\phi$ , град	$E$ , МПа	
1	<b>Суглинок м'якопластичний заторфований</b> (об'єкт "Будівля банку Універсальний", м. Львів)	до виконання	1,69	19	6	–	25 см (макс. вплив – 15 см)
		приріст	+4...16%	+5...47%	+33...216%	–	
		після виконання	1,75...1,96	20..28	8...19	–	
2	<b>Супісок лесовий, просідний</b> (об'єкт "Будівля Лейпциг", м. Київ)	до виконання	–	–	–	–	10 см
		приріст*	+2%	+13%	+11%	+50%	
		після виконання	1,52...1,54	7,5...8,5	26,5...29,5	4..6	
3	<b>Супісок пилюватий твердий</b> (об'єкт "Андріївська церква", м. Київ)	до виконання	1,60	35	24		15 та 30 см
		приріст	+4...8%	–	–	–	
		після виконання	1,64...1,72	–	–	–	

\* приріст між максимальним та мінімальним значеннями в зоні впливу

Оскільки на двох об'єктах ґрунт, що був досліджений, – супісок, зробимо загальний графічний аналіз для визначення зони впливу на оточуюче ґрунтове середовище при виконанні струменево-ін'єкційних елементів.

Для побудови графіка розрахуємо відносне значення для щільності ґрунту:  $\gamma' = \gamma / \gamma_d$ , де  $\gamma$  – щільність ґрунту, відібраного із зони впливу,  $\gamma_d$  – щільність часток ґрунту. Відносне значення розташування зразка ґрунту в залежності від міжколонної відстані:  $b' = b / B$ ,  $b$  – відстань розташування ґрунтового зразку від поверхні ґрунтоцементної колони,  $B$  – міжколонна відстань.

На рис. 3.38 нанесено криву для супіску лесового та дві криві для супіску пилюватого твердого, в залежності від відносного значення відстані до поверхні двох колон. Згідно з графіком точка перетину для кривих двох видів супіску:  $b' = 0,118$  та  $\gamma' = 1,139$ . Тобто для відстані між двома

грунтоцементними колонами 900 мм (що відповідає відстані на цих двох об'єктах) – розмір зони покращеного ґрунту складає:

$$b = b' \cdot B = 0,118 \cdot 900 = 106 \text{ (мм)} \quad (3.1)$$

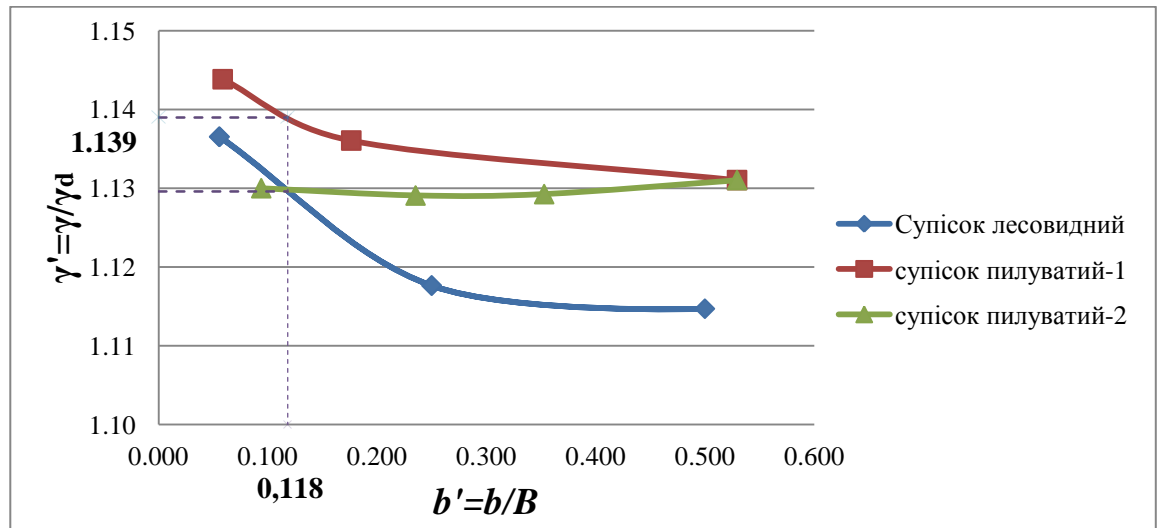


Рисунок 3.38 – Розподіл відносних значень щільності покращеного ґрунту з відстанню

Для ґрунтоцементної колони діаметром 600 мм площа покращеного ґрунту навколо:

$$S_k = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,283 \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3.2)$$

$$S_{\text{гр}} = \frac{\pi \cdot ((d+D)^2 - D^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,7^2 - 0,6^2)}{4} = 0,102 \text{ (м}^2\text{)}. \quad (3.3)$$

Використовуючи дослідні дані щодо зміни фізико-механічних властивостей ґрунту, що оточує струменево-цементацийний елемент, та доведеної практично та графічно наявності зони покращеного ґрунту навколо ґрунтоцементної колони, можна дослідити змінення напружено-деформованого стану масиву ґрунту з елементами підсилення, виконаними за струменевою технологією з включенням в розрахунок покращених зон ґрунту.

*Порівняння експериментальних даних відібраних зразків ґрунтоцементного матеріалу.*

Міцність ґрунтоцементного матеріалу струменево-цементацийних елементів відіграє важливу роль, особливо коли ці елементи використовуються для підсилення ґрунтового масиву під існуючими будівлями або для

майбутнього будівництва. Беручи до уваги міцність на стиск ґрунтоцементного матеріалу, інженер-проектувальник зможе оцінити, яке навантаження можуть сприйняти струменево-цементацийні елементи.

Як описано в розділі 1 даної роботи, на міцність ґрунтоцементу впливають багато факторів: від типу струменевої цементациї та технологічних параметрів до В/Ц співвідношення розчину. В даному розділі розглянуто залежність величини міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу тільки від типу ґрунту для однокомпонентної технології.

Ґрунтуючись на дослідних даних з виконання ґрунтоцементних елементів в різних інженерно-геологічних умовах на території України, наведемо порівняльний аналіз отриманих результатів (табл. 3.11).

Таблиця 3.11 – Порівняльний аналіз міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу

№, n/n	Тип ґрунту	Фізико-механічні характеристики ґрунту			Міцність на стиск ґрунтоцементного матеріалу, МПа
		$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	c, кПа	$\phi$ , град	
1	<b>Делювіально-зсувні піщані ґрунти</b> (об'єкт на пр. Шевченка, м. Київ)	1,84	8	18	11,9...23,8
2	<b>Суглинок м'якопластичний заторфований</b> (об'єкт "Будівля банку Універсальний", м. Львів)	1,69	19	6	3,7...6,7
3	<b>Супісок лесовий, просідний</b> (об'єкт "Будівля Лейпциг", м. Київ)	1,65	10	22	4,2...12,6
4	<b>Супісок пилуватий твердий</b> (об'єкт "Андріївська церква", м. Київ)	1,60	35	24	10,2...14,3
5	<b>Шлаки насипні доменного виробництва</b> (реконструкція в м. Єнакієве)	1,85	2	36	4,8...11,2

Найнижчий показник міцності на стиск в заторфованих ґрунтах (3,7 МПа), найвищий з отриманих – в піщаних ґрунтах (23,8 МПа).

Для порівняння та аналізу отриманих даних використаємо графік залежності міцності ґрунтоцементного матеріалу від типу ґрунту та віку зразка, що був опублікований L.W. Wong, D.H. Ju, P.J. Wu. [94]. Після

нанесення отриманих чисельних даних значень міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу (рис. 3.39, 3.40) можна відзначити, що всі значення виходять за діапазони міцності, запропоновані авторами. Навіть такий ґрунт як техногенний (шлаки доменного виробництва), при обробці показав результат як гравійний та піщаний – 8 МПа.

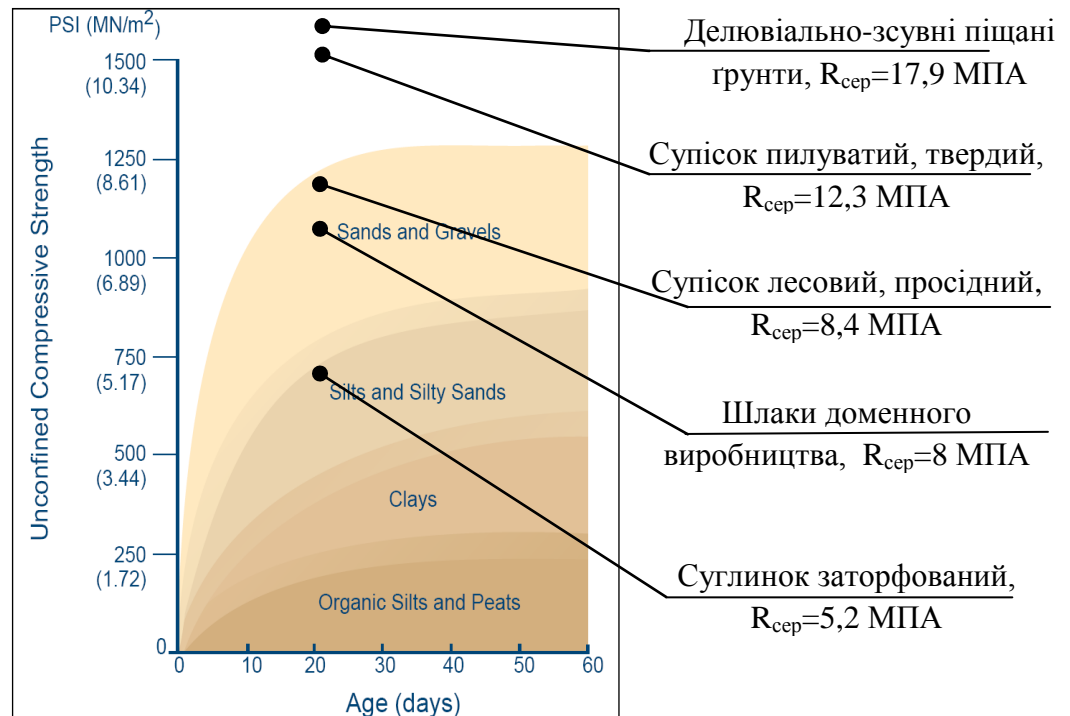


Рисунок 3.39 – Порівняння отриманих даних з літературними [105]

Дослідні результати щодо міцності ґрунтоцементного матеріалу колон, виконаних за струменево-цементацийною технологією, наведені на рис. 3.40.

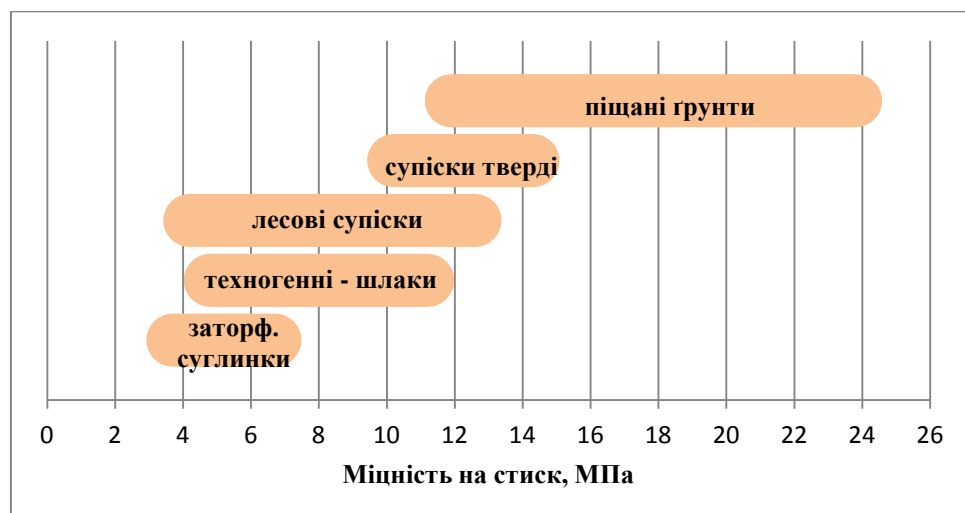


Рисунок 3.40 – Діапазони значень міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу за результатами досліджень автора

Отримані значення відповідають будівельним умовам на території України і в подальшому дозволять використовувати значення міцності при проєктуванні конструкцій з використанням ґрунтоцементних елементів.

### 3.4 Розрахунок залишкового тиску струменя цементного розчину та числове моделювання впливу на оточуючий ґрунт

В процесі дослідної роботи на практиці підтверджено факт впливу високонапірного струменя розчину на оточуюче ґрунтове середовище під час виконання ґрунтоцементних колон. В даному підрозділі розглянуто розрахунок залишкового тиску високонапірного струменя, який в свою чергу чинить вплив на оточуючий ґрунт, змінюючи їх фізико-механічні характеристики. Всі вихідні данні прийняті з виконаного об'єкту реконструкції.

Струмінь цементного розчину, що виходить під високим тиском з сопла, що розташований на гідромоніторі, обертається і руйнує оточуючий ґрунт, перемішуючи його з цементним розчином. Якщо при першому обертанні струмінь руйнує ґрунт, то при другому струмінь знаходиться вже в цементному розчині і його можна розглядати як затоплений струмінь рідини (рис. 3.41).

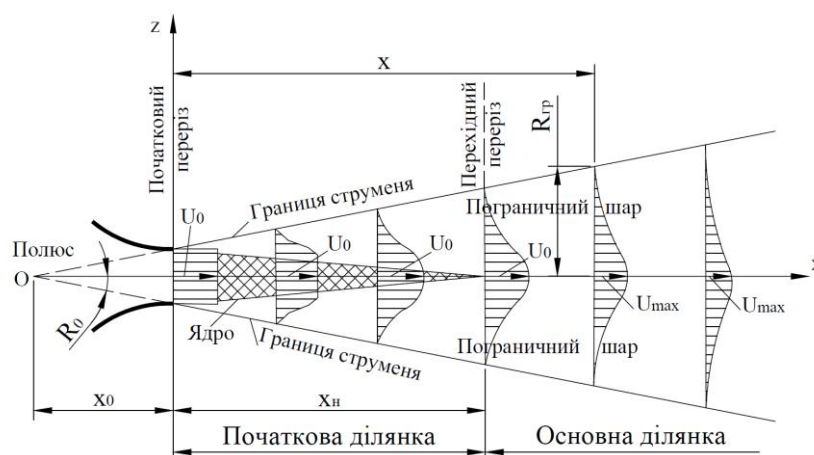


Рисунок 3.41 – Схема затопленого вільного турбулентного струменя

Для розрахункової схеми радіус сопла  $R_0=1,2$  мм (діаметр сопла, що розташований на гідромоніторі 2,4 мм)

Швидкість струменя цементного розчину на виході з сопла:

$$U_0 = \frac{4 \cdot Q_p / (\pi \cdot d_c^2)}{n_c} = \frac{(400 \cdot 100) / (6 \cdot 3,1416 \cdot 2,4^2)}{2} = 184 \text{ (М/с)} \quad (3.4)$$

З огляду, що діаметр ґрунтоцементної колони 0,6 м, то руйнуючий радіус  $x=0,3$  м.

Швидкість на вісі основної ділянки [38]:

$$U_{max} = \frac{0,96}{\frac{a \cdot x}{R_0} + 0,29} \cdot U_0 = \frac{0,96}{\frac{0,08 \cdot 0,3}{1,2 \cdot 10^{-3}} + 0,29} \cdot 184 = 8,71 \text{ (М/с)}, \quad (3.5)$$

де  $a$  – коефіцієнт структури 0,08.

Половина висоти струменя на відстані  $x=0,3$  м від сопла:

$$R = \left( 3,4 \frac{a \cdot x}{R_0} + 1 \right) \cdot R_0 = \left( 3,4 \frac{0,08 \cdot 0,3}{1,2 \cdot 10^{-3}} + 1 \right) \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,083 \text{ (м)} \quad (3.6)$$

Виходячи з того, що ми знаємо руйнуючий радіус струменя, для розрахунку залишкового тиску, що діє на оточуючий ґрунт, що не був зруйнований, розрахуємо гідродинамічний тиск струменя рідини на стінку:

$$P = \rho_p \cdot \omega \cdot U^2 = 1500 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,166^2}{4} \cdot 8,71^2 = 2458 \text{ (Н)}, \quad (3.7)$$

де  $\rho_p$  – щільність розчину,  $\omega$  – поперечний переріз потоку,  $U$  – середня швидкість потоку рідини.

При розрахунку струменя на  $1 \text{ м}^2$  отримаємо залишковий гідродинамічний тиск  $P = 113,8 \text{ кН/м}^2$ .

Розраховані данні залишкового тиску, що спричиняє високонапірний струмінь цементного розчину на оточуючий ґрунт, використаємо для створення моделі в програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

Інженерно-геологічні характеристики ґрунту та геометричні характеристики ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією, приймемо на прикладі об'єкта "Підсилення фундаментів при реконструкції Андріївської церкви в м. Києві", на території якого були проведені досліді ґрунтоцементного матеріалу та ґрунтових зразків, відібраних в міжколонному просторі.

Приймаємо для ґрунту та матеріалу тіла ґрунтоцементної колони модель Mohr–Coulomb. Щоб змодельовати сам процес виконання струменево-цементацийної колони та вплив на оточуючий ґрунт матеріал колони заданий низькими характеристиками, щоб відобразити його рідкий стан.

Характеристики супіску твердого:  $\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$ ,  $\phi=23^\circ$ ,  $c=33 \text{ кПа}$ ,  $E=17 \text{ МПа}$ . Характеристики ґрунтоцементу колони:  $\gamma=1,55 \text{ т/м}^3$ ,  $\phi=3^\circ$ ,  $c=3 \text{ кПа}$ ,  $E=0,15 \text{ МПа}$ .

Довжина колони – 5 м, діаметр – 0,6 м, міжколонна відстань – 0,85 м, фундамент – цегляний, глибина фундаменту від денної поверхні – 2 м.

По контуру поверхні ґрунтоцементної колони прикладено розрахований залишковий тиск  $P = 113,8 \text{ кН/м}^2$ .

На рис. 3.42 показано деформовану сітку створеної моделі та загальні переміщення, що в ній виникають. Максимальне значення загального переміщення – 8,5 мм і виникає воно на поверхні ґрунтоцементної колони, а на рис. 3.42 чітко відокремлюються зони деформації, тобто зони впливу, що виникають від залишкового тиску високонапірного струменя цементного розчину. Розміри цих зон – 29,5 та 26,5 см (рис. 3.43). В порівнянні з дослідними даними, що були отримані при дослідженні ґрунтових зразків, відібраних в між колонному просторі, максимальні зони впливу були 15 та 30 см від поверхні першої та другої ґрунтоцементної колони.

Якщо виділимо одиничний об'єм ґрунту, що набув деформації, в приколонному просторі, зможемо розрахувати зміну об'ємної ваги ґрунту.

Щільність ґрунту:

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (3.8)$$

Позначимо  $\gamma_1, V_1$  щільність та об'єм ґрунту до виконання колон, яка дорівнює  $1,6 \text{ т/м}^3$ ,  $\gamma_2, V_2$  – ґрунту, що був ущільнений. Прийmemo, що вага ґрунту не змінилася та прирівняємо вираз щільності для першого і другого ґрунтів:

$$\gamma_1 \cdot V_1 = \gamma_2 \cdot V_2, \text{ звідси} \quad (3.9)$$



$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 \cdot V_1}{V_2} = \frac{1,6 \cdot (0,295 \cdot 1 \cdot 1)}{(0,295 - 0,008) \cdot 1 \cdot 1} = 1,65 \text{ (т/м}^3\text{)} \quad (3.10)$$

Повертаючись до результатів випробування ґрунтових зразків з об'єкта "Реконструкція Андріївської церкви" з таблиці 3.6 – щільність відібраного ґрунту змінювалася від 1,64 до 1,67 т/м<sup>3</sup>. В результаті моделювання впливу виконання ґрунтоцементних колон було отримане значення (3.10) змінення щільності ґрунту із зони впливу – 1,65 т/м<sup>3</sup>, що відповідає дослідним даним.

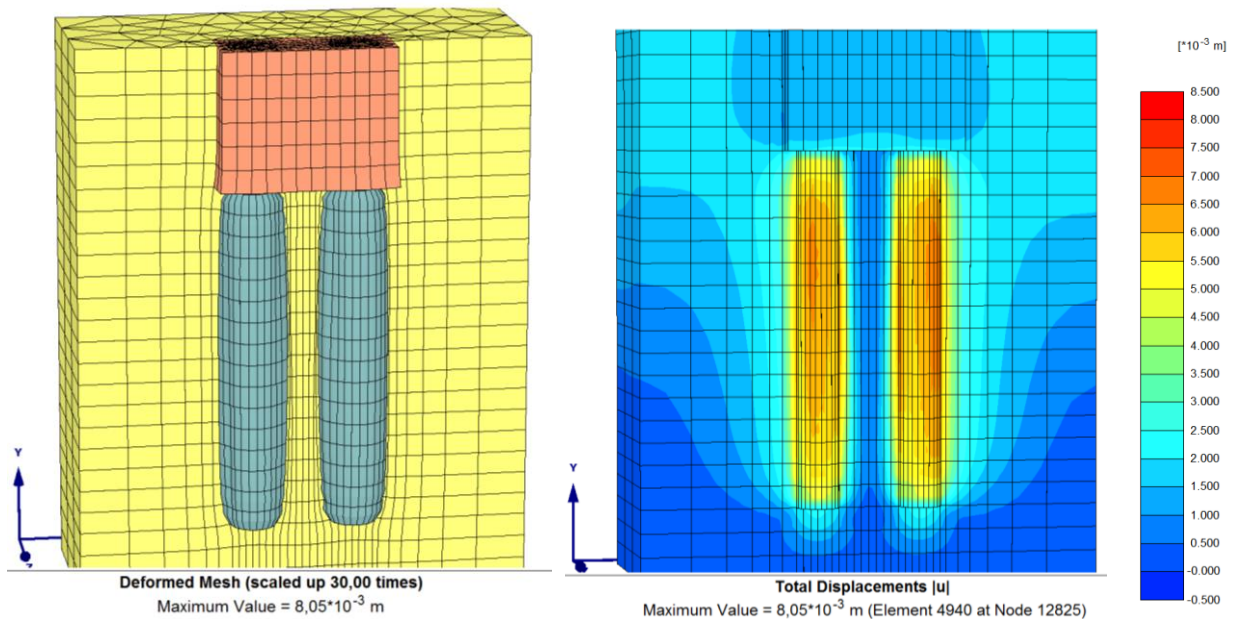


Рисунок 3.42 – Деформована сітка кінцевих елементів розрахункової моделі

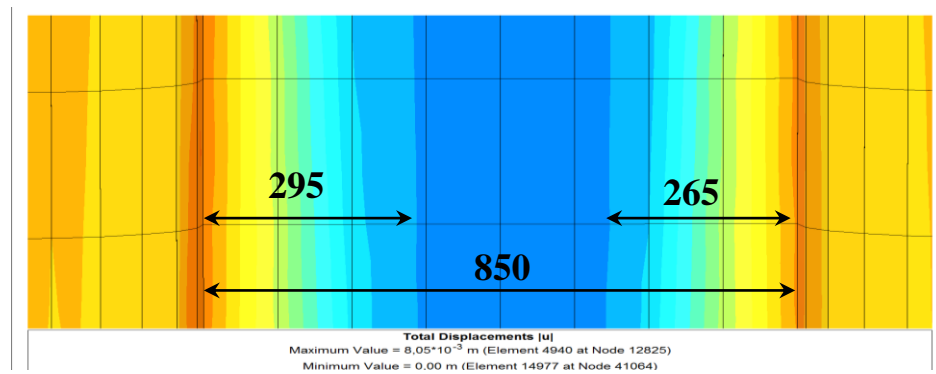


Рисунок 3.43 – Зона впливу на ґрунт в міжколонному просторі

На рисунках 3.44...3.46 представлені горизонтальні та вертикальні переміщення та вплив виконання струменево-цементацийних колон на вертикальні та горизонтальні напруження ґрунтового масиву. При дослідних результатах зони впливу дорівнювали 15 та 30 см, при моделюванні були отримані наступні результати: 29,5 та 26,5 см.

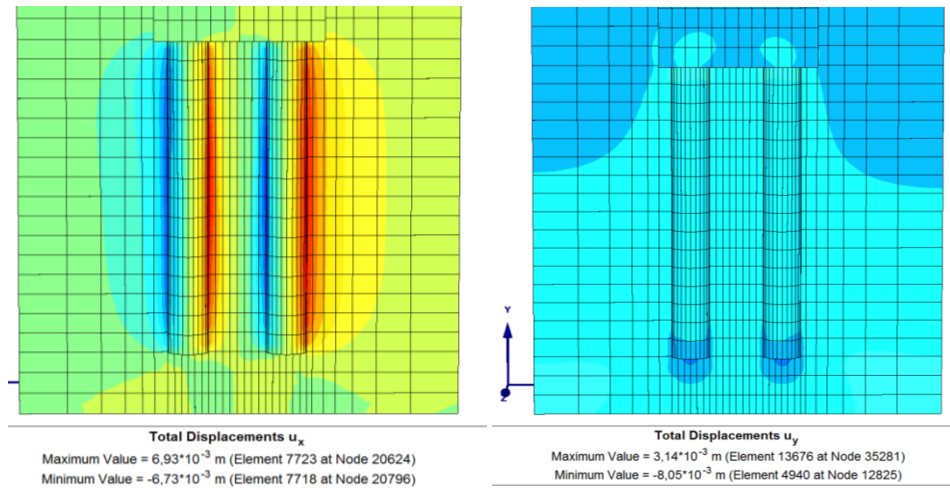
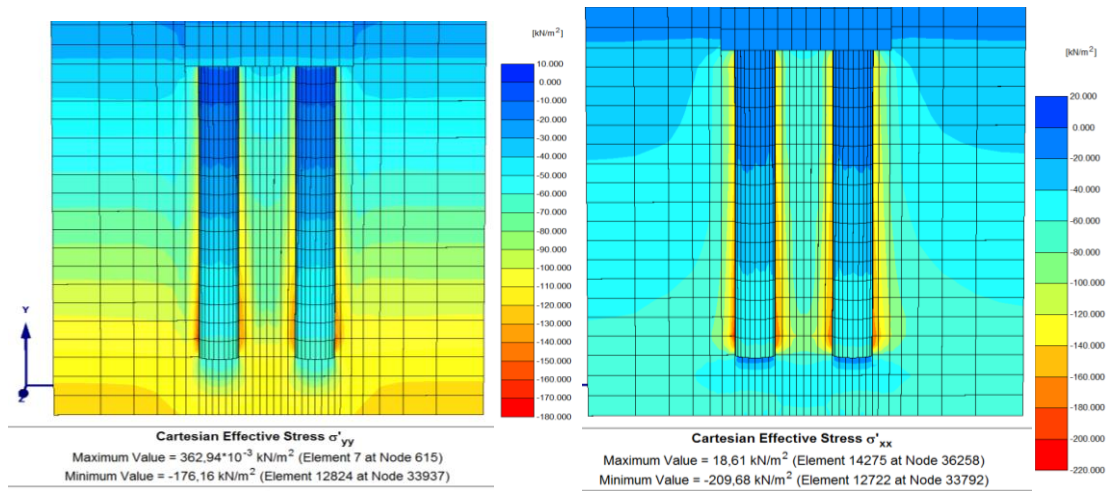
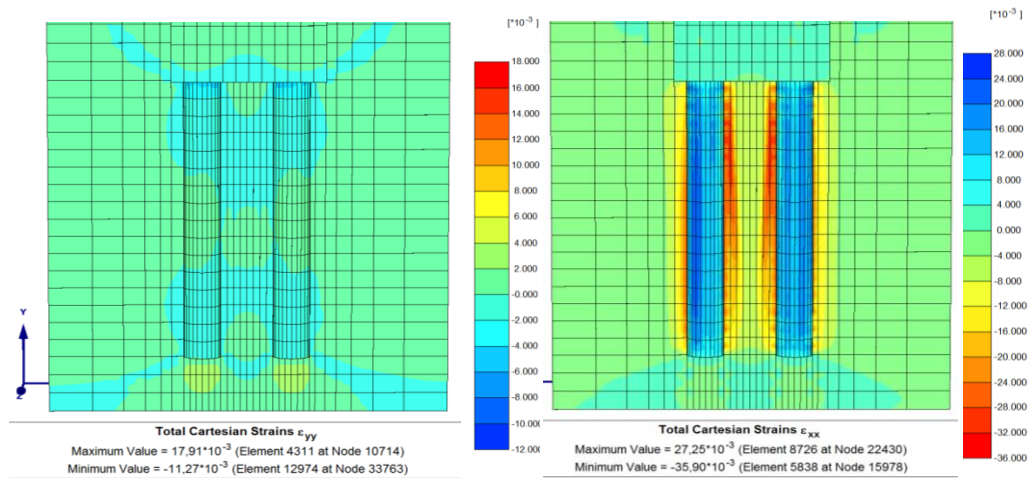
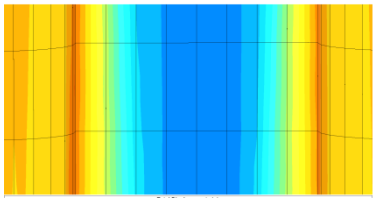
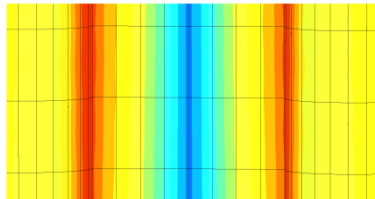
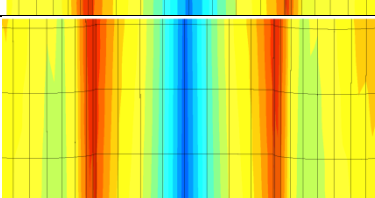
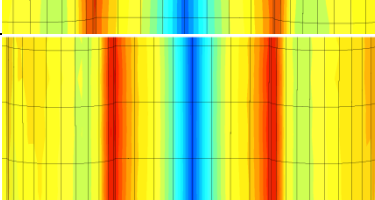
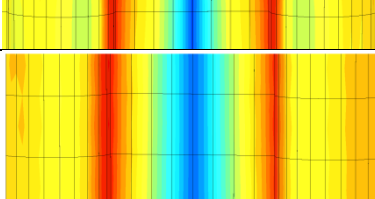
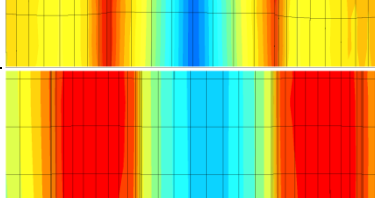
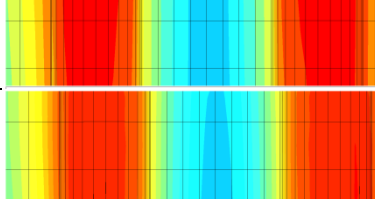


Рисунок 3.44 – Горизонтальні та вертикальні переміщення моделі

Рисунок 3.45 – Вертикальні  $\sigma_{yy}$  та горизонтальні  $\sigma_{xx}$  ефективні напруженняРисунок 3.46 – Вертикальні  $\epsilon_{yy}$  та горизонтальні  $\epsilon_{xx}$  деформації ґрунту

Таблиця 3.12 – Моделювання зон впливу в різних типах ґрунтів

Ґрунт	Характеристики ґрунту	Розрахункова модель	Максимальне переміщення, мм	Максимальна зона впливу, мм
Супісок твердий	$\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$ , $\phi=23^\circ$ , $c=33 \text{ кПа}$ , $E=17 \text{ МПа}$		8	295
Супісок пилюватий пластичної консистенції	$\gamma=1,8 \text{ т/м}^3$ , $\phi=23^\circ$ , $c=13 \text{ кПа}$ , $E=12 \text{ МПа}$		12	360
Пісок пилюватий середньої щільності	$\gamma=1,65 \text{ т/м}^3$ , $\phi=26^\circ$ , $c=2 \text{ кПа}$ , $E=11 \text{ МПа}$		15	375
Пісок мілкий щільний	$\gamma=1,61 \text{ т/м}^3$ , $\phi=30^\circ$ , $c=8 \text{ кПа}$ , $E=20 \text{ МПа}$		8	365
Суглинок м'якопластичний легкий	$\gamma=1,92 \text{ т/м}^3$ , $\phi=14^\circ$ , $c=20 \text{ кПа}$ , $E=12 \text{ МПа}$		10	360
Суглинок пилюватий твердої консистенції	$\gamma=1,94 \text{ т/м}^3$ , $\phi=23^\circ$ , $c=73 \text{ кПа}$ , $E=23 \text{ МПа}$		2	270
Глина твердої консистенції	$\gamma=1,96 \text{ т/м}^3$ , $\phi=18^\circ$ , $c=178 \text{ кПа}$ , $E=75 \text{ МПа}$		1	150

Підтвердивши відповідність розрахункової моделі до дослідних результатів, що були отримані на будівельному об'єкті, можна змодельовати вплив в інших типах ґрунту. Всі типи ґрунту прийняти з інженерно-геологічних вишукувань міста Києва. Результати моделювання занесені в таблицю, а на графіку рисунка 3.47 побудовані криві залежності переміщення ґрунту від відстані між колонами.

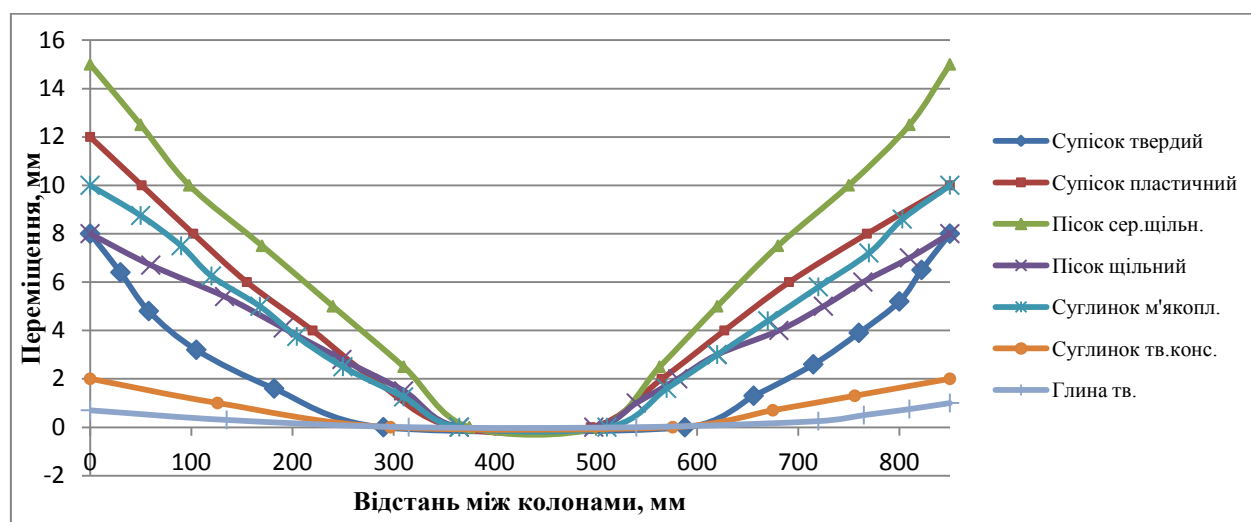


Рисунок 3.47 – Переміщення ґрунту в між колонному просторі для різних типів ґрунтів

Опираючись на отримані результати, відмітимо, що найбільший вплив на оточуючий ґрунт при виконанні ґрунтоцементної колони струменевою технологією, отримано в пісках середньої щільності – 37,5 см, найменший – в твердих глинах – 15 см. Але при отриманих зонах впливу необхідно мати на увазі, що в пісках середньої щільності переміщення ґрунту після впливу на нього високонапірного струменя склало 15 мм, а в глинах твердих та суглинках твердої консистенції лише 1–2 мм, тобто переміщення ґрунту майже не відбувається.

### 3.5 Використання виділеної покращеної зони при моделюванні підсилення ґрунтової основи

В попередньому підрозділі при моделюванні впливу високонапірного струменя цементного розчину на оточуючий ґрунтовий масив дослідно

підтверджено, що залишковий тиск струменя впливає на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового середовища. Цей вплив залежить від типу та консистенції ґрунту, що оточує ґрунтоцементну колону. Під вплив підпадають не тільки щільність ґрунту, а і питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя та модуль пружності.

Використовуючи середнє значення зміни фізико-механічних характеристик навколишнього ґрунту, що були підтверджені на об'єктах з супіском, та розмірів зони впливу, можна перевірити значимість використання цих даних для моделювання підсилення ґрунтової основи будівель та споруд.

Для моделювання та порівняльного аналізу обраний об'єкт з подібними ґрунтовими умовами. Це піщані на супіщані ґрунти на реконструкції будівлі «Кінотеатр «Жовтень» на вулиці Костянтинівській, 26 в м . Києві.

Інженерно–геологічні умови (рис. 3.48): ІГЕ 1 (t ІУ) – насипний шар неоднорідний; ІГЕ 2 (а ІV-ІІІ) – супісок пилюватий, жовтувато–сірий, з тонкими прошарками піску. Відкрита потужність шару по виробкам 0,4...0,65 м; ІГЕ 3 (а ІV-ІІІ) – пісок дрібний, жовто–сірий, з прошарками супіску, середньої щільності, малого ступеню водонасичення, потужність шару 0,4...1,0 м; ІГЕ 4 (а ІV-ІІІ) – супісок пилюватий, сіро–бурий, пластичний. Залягає на всій ділянці шаром потужністю 0,7...1,4 м; ІГЕ 5 (а ІІІ) – пісок дрібний, сірий, світло-сірий, з тонкими прошарками супіску, середньої щільності, насичений водою, пройдена потужність шару 5.5...7,5 м.

Фундаменти під стінами будівлі мілкового закладання, стрічкові, цегляні, з уширенням (продовження стін), з глибиною закладання в різних рівнях. В підвальної частині будівлі глибина закладання фундаментів 0, 85...1,85 м від рівня підлоги підвалу, що відповідає відміткам 94,85...95,75 м. Ширина фундаментів по підшві 0,85...115см.

Схема підсилення основи представляла собою ґрунтоцементні колони діаметром 600 мм з уширенням 800 під фундаментом, кількість 265 шт, середньою довжиною 9 м (рис. 3.48).

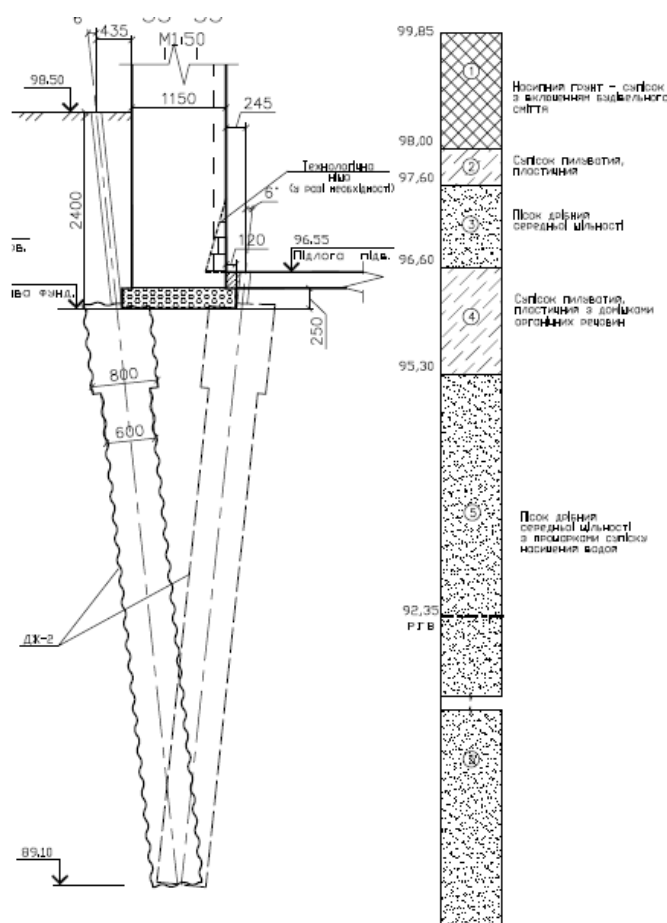


Рисунок 3.48 – Схема підсилення будівлі

Таблиця 3.13 – Фізико-механічні характеристики ґрунтів та покращені характеристики

Номер ПГЕ	Номенклатурна назва ґрунту	Природна вологість	Показник текучості	Коефіцієнт пористості	Щільність, г/см <sup>3</sup>		Загальний модуль деформації, МПа		Питоме зчеплення КПа		Кут внутрішнього тертя, градус	
		W	I <sub>L</sub>	ε	ρ	+4%*	E	+50%*	C	+13%*	φ	+11%*
1	Насипний ґрунт – супісок з включенням будівельного сміття	0.14	<0		1.57		5	–		–		–
2	Супісок пилуватий, пластичний	0.23	0.2–0.5	0.75	1.89		10	–	10	–	21	–
3	Пісок дрібний, середньої щільності	0.23	–	0.66	1.98		22	–	2	–	32	–
4	Супісок пилуватий, з домішками органічних речовин, пластичний	0.23	0.6	0.76	1.87	1.94	8	12	9	10.2	21	23.3
5	Пісок дрібний, середньої щільності	0.22	–	0.61	1.97	2.05	28	42	2	2.3	33	36.6

\* Процент покращення фізико-механічних характеристик ґрунтів, що оточують ґрунтоцементну колону, прийнятий на основі експериментальних даних в таблиці 3.10.



Для моделювання підсилення була використана розрахункова програма Plaxis 3D Foundation. Основні елементи розрахункової схеми: конструкція будівлі представлена в моделі елементами "walls" для внутрішніх і зовнішніх стін, "floors" для перекриттів і фундаментної плити. Модель для дослідження ґрунтової основи – Модель Мора–Кулона (Mohr–Coulomb Model) [96]. Моделлю Linear Elastic Model були змодельовані ґрунтоцементні елементи, виконані за технологією струменевої цементації.

Розміри розрахункової моделі – 90 на 75 м, глибина розглядаємої ґрунтової товщі – 25 м. При створенні трьохвимірної моделі кінцевих елементів були використані 15-ти вузлові елементи. Загальна кількість елементів – 27344 шт, кількість вузлів – 78996 шт.

На рисунках 3.49, 3.50 показаний розрахунок будівлі до початку реконструкції. Максимальні розрахункові переміщення склали 12,8 см.

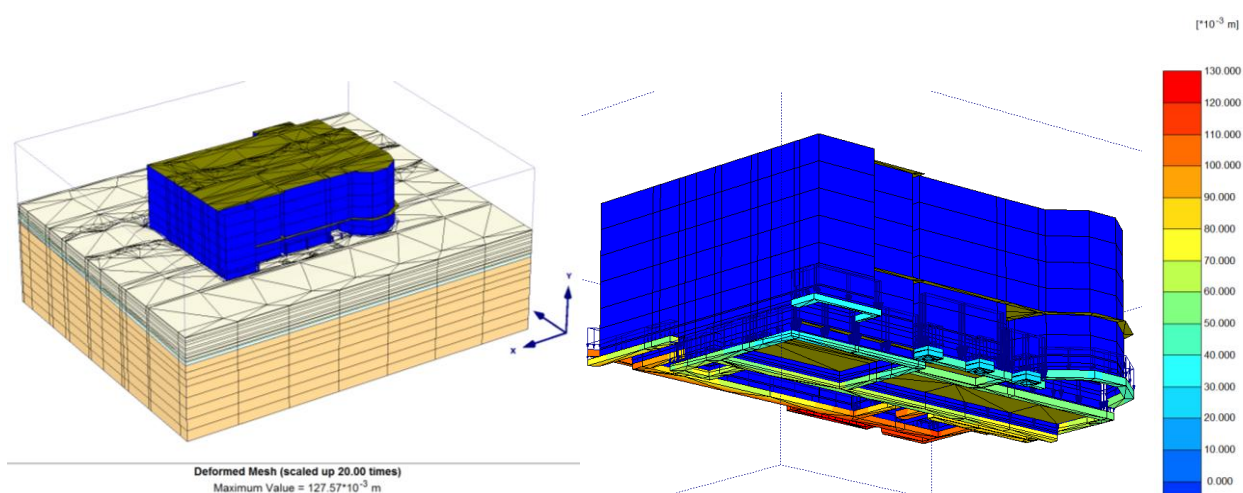


Рисунок 3.49 – Розрахункова модель будівлі до підсилення та загальні переміщення фундаментів

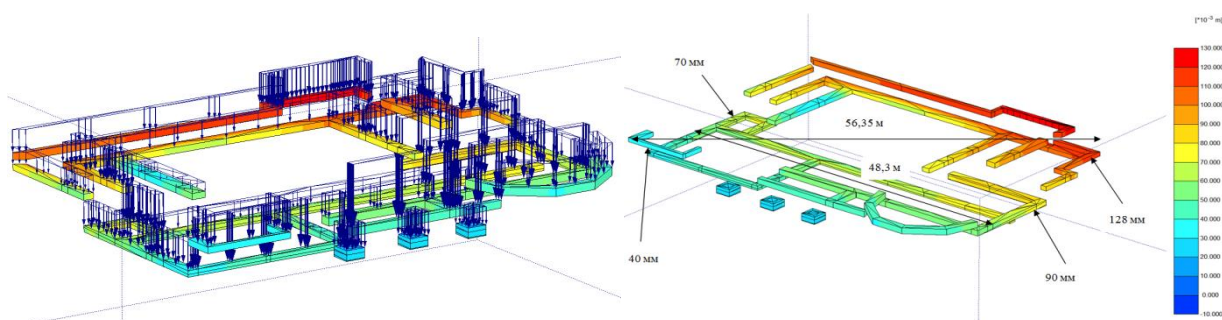


Рисунок 3.50 – Схема фундаментів з загальними переміщеннями та прикладені навантаження

Для моделювання підсилення основи фундаментів ґрунтоцементними колонами, що виконані за технологією струменевої цементації, можна використати два методи. Перший, коли елементи ґрунтоцементних колон задаються як елементи паль і кожна колона вводиться окремо з відповідними характеристиками на одиницю елементу. Другий, коли масив, що підсилюється, задається осередненими характеристиками в залежності від площі ґрунтоцементних колон та площі ґрунту на одиницю глибини під всією площею фундаментів.

Для того, щоб змодельовати можливість використання зони покращеного ґрунту, використаний другий метод.

Приведений модуль деформації ґрунту по глибині:

$$E_{\text{гр}}' = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2 + \dots + E_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} = \frac{10 \cdot 0.5 + 22 \cdot 1 + 8 \cdot 1.5 + 28 \cdot 6}{0.5 + 1 + 1.5 + 6} \quad (3.11)$$

$$= 23 \text{ (МПа)}$$

Приведений модуль деформації по площі залежить від кількості ґрунтоцементних колон під фундаментами та їх діаметра.

Площа фундаментів – 319 м<sup>2</sup>.

Площа ґрунтоцементних колон:

$$S_{\text{к}} = \frac{3.14 \cdot 0.6^2}{4} \cdot 265 = 75 \text{ (м}^2\text{)} \quad (3.12)$$

Приведений модуль деформації по площі:

$$E_{\text{гр+к}} = \frac{E_{\text{гр}}' \cdot S_{\text{гр}} + E_{\text{к}} \cdot S_{\text{к}}}{S_{\text{гр}} + S_{\text{к}}} = \frac{23 \cdot (319 - 75) + 19 \cdot 10^3 \cdot 75}{(319 - 75) + 75} \quad (3.13)$$

$$= 4,5 \cdot 10^3 \text{ (МПа)}$$

На рисунках 3.51 та 3.52 показано моделювання підсилення основи будівлі ґрунтоцементними колонами, виконаними за технологією струменевої цементації. Максимальне осідання після підсилення основи склало 2,6 см.

Надалі в розрахункову модель введено зону покращеного ґрунту з підвищеними фізико-механічними характеристиками (табл. 4.2). Процент



зміни значень фізико-механічних характеристик прийнятий на основі виконаних в дисертаційній роботі досліджень на будівельних об'єктах.

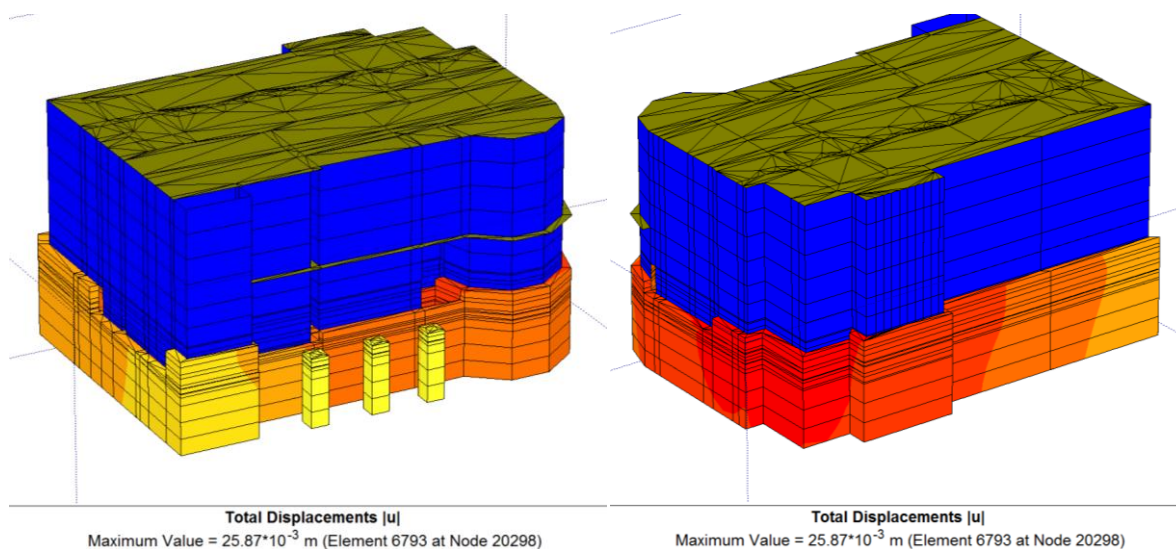


Рисунок 3.51 – Загальні переміщення фундаментів та ґрунтоцементних колон

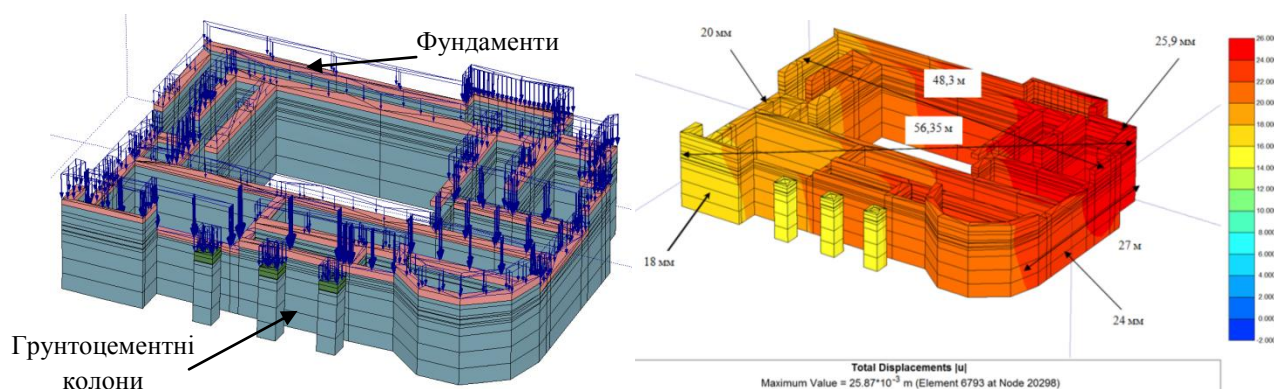


Рисунок 3.52 – Ґрунтоцементні колони, фундаменти та прикладені навантаження з максимальними значеннями переміщень.

Для порівняння результатів зменшено кількість ґрунтоцементних колон (265 шт) на 5, 10 та 15 % та введено в розрахунок зону покращеного ґрунту (15 см). Результати розрахунків занесено в таблицю 3.14.

Для порівняльного аналізу переваг введення зони покращеного ґрунту при моделюванні підсилення основи існуючих будівель в піщаних ґрунтах (рис. 3.53) виконано розрахунок зі зменшенням ґрунтоцементних колон, але без покращеного ґрунту (рис. 3.54). Результати моделювання показали, що осідання будівлі з проектною кількістю колон склали 2,6 см, при зменшенні кількості ґрунтоцементних колон на 15 % та введення зон покращеного ґрунту

– 4,0 см, при зменшенні проєктною кількості колон, але без вчення зон покращеного ґрунту осідання збільшилися до 5,6 см.

Таблиця 3.14

Розрахунок площі ґрунтоцементних колон та зони ґрунту з покращеними характеристиками

Варіант розрахункової моделі	Розрахункові дані по площі ґрунтоцементних колон та зон покращеного ґрунту	Максимальне осідання, см
265 шт	$S_k = 75 \text{ м}^2$ $E_{\text{гр+к}} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	2,6
Зменшення кількості колон на 5% (252 шт)	$S_k = \frac{3.14 \cdot 0.6^2}{4} \cdot 252 = 71 \text{ м}^2$ $S_{\text{покр.гр.}} = \frac{3.14 \cdot (0.75^2 - 0.6^2)}{4} \cdot 252 = 40 \text{ м}^2$ $E_{\text{гр+к}} = \frac{E_{\text{гр}}' \cdot S_{\text{гр}} + E_k \cdot S_k + E_{\text{покр.гр.}} \cdot S_{\text{покр.гр.}}}{S_{\text{гр}} + S_k + S_{\text{покр.гр.}}} =$ $= \frac{23 \cdot (319 - 71 - 40) + 19 \cdot 10^3 \cdot 71 + 34,5 \cdot 40}{(319 - 71 - 40) + 71 + 40}$ $= 4,25 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	2,8
Зменшення кількості колон на 10% (239 шт)	$S_k = \frac{3.14 \cdot 0.6^2}{4} \cdot 239 = 68 \text{ м}^2$ $S_{\text{покр.гр.}} = \frac{3.14 \cdot (0.75^2 - 0.6^2)}{4} \cdot 239 = 38 \text{ м}^2$ $E_{\text{гр+к}} = \frac{E_{\text{гр}}' \cdot S_{\text{гр}} + E_k \cdot S_k + E_{\text{покр.гр.}} \cdot S_{\text{покр.гр.}}}{S_{\text{гр}} + S_k + S_{\text{покр.гр.}}} =$ $= \frac{23 \cdot (319 - 68 - 38) + 19 \cdot 10^3 \cdot 68 + 34,5 \cdot 38}{(319 - 68 - 38) + 68 + 38}$ $= 4,07 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	3,2
Зменшення кількості колон на 15% (225 шт)	$S_k = \frac{3.14 \cdot 0.6^2}{4} \cdot 225 = 64 \text{ м}^2$ $S_{\text{покр.гр.}} = \frac{3.14 \cdot (0.75^2 - 0.6^2)}{4} \cdot 225 = 36 \text{ м}^2$ $E_{\text{гр+к}} = \frac{E_{\text{гр}}' \cdot S_{\text{гр}} + E_k \cdot S_k + E_{\text{покр.гр.}} \cdot S_{\text{покр.гр.}}}{S_{\text{гр}} + S_k + S_{\text{покр.гр.}}} =$ $= \frac{23 \cdot (319 - 64 - 36) + 19 \cdot 10^3 \cdot 64 + 34,5 \cdot 36}{(319 - 64 - 36) + 64 + 36}$ $= 3,8 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	4,0

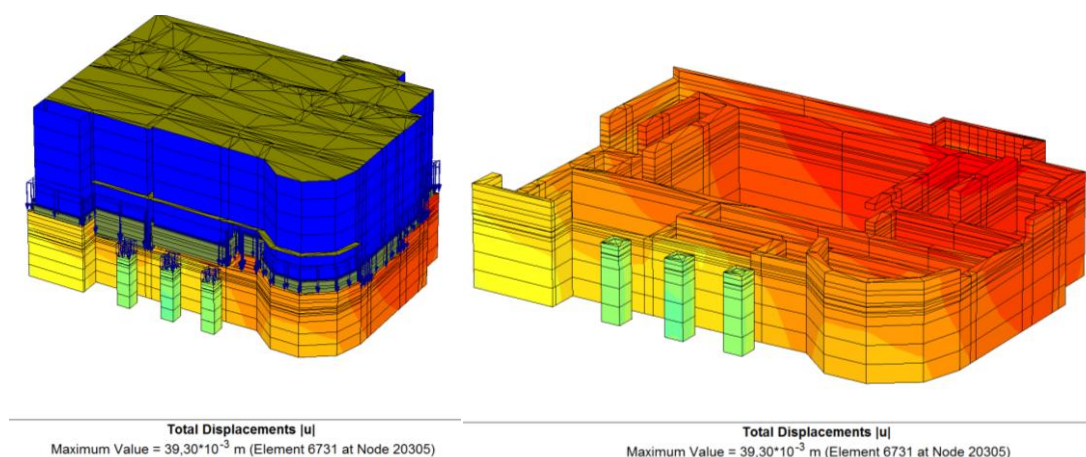


Рисунок 3.53 – Введення в розрахунок зони покращеного ґрунту та зменшення кількості ґрунтоцементних колон на 15%. Загальні переміщення розрахункової моделі

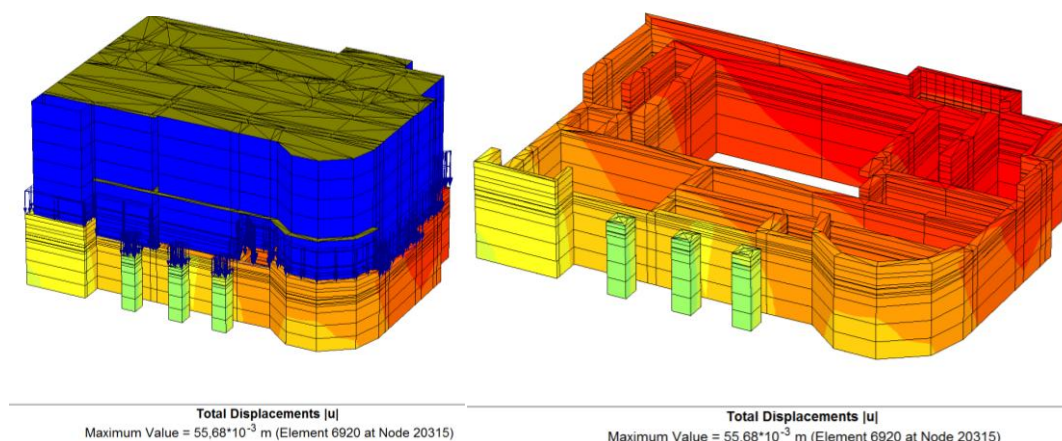


Рисунок 3.54 – Зменшення кількості ґрунтоцементних колон на 15% без введення покращеного ґрунту. Загальні переміщення розрахункової моделі

Аналізуючи результати, наведені в таблиці 3.14, можна зробити висновок, що введення зони покращеного ґрунту дозволяє зменшити кількість ґрунтоцементних колон на 15%. Максимальні осідання будівлі при такому зменшенні збільшилися з 2,6 до 4,0 см. Збільшення осідань будівлі, що реконструюється, не є понаднормальними, але подальше зменшення кількості колон призведе до великого зростання кроку між колонами. Виходячи з того, що фундаменти будівлі цегляні, великі кроки між ґрунтоцементними колонами приведуть до збільшення напружень в тілі фундаментів. Також необхідно враховувати, що загальна несуча здатність елементів підсилення зменшиться, що необхідно враховувати при підсиленні ґрунтових основ будівель.

### Висновки за розділом 3

В розділі описано експериментальні дослідження ґрунтоцементного матеріалу та зони впливу на оточуючий ґрунт при виконанні струменево-цементацийних елементів. Експериментальні дослідження проведені на чотирьох об'єктах на території України в різних ґрунтових умовах. Для дослідження впливу на оточуюче ґрунтове середовище на трьох об'єктах відібрано ґрунтові зразки з наступним дослідженням фізико-механічних характеристик. Для вивчення зміни міцнісних характеристик ґрунтоцементного матеріалу колон струменевої цементації на всіх чотирьох дослідних майданчиках відібрано зразки матеріалу з подальшим випробуванням їх на стиск.

За результатами досліджень маємо наступні висновки:

Струменево-цементацийні елементи, що виконані в **заторфованих суглинках**:

- максимальна зона впливу високонапірного струменя на оточуючий ґрунт – 15 см;
- максимальне збільшення щільності ґрунту після впливу на нього високонапірного струменя розчину склало 16 %, мінімальне – 4 %, питоме зчеплення збільшилося на 5...47 %;
- значення міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 3,7; 6,5; 6,7 МПа.

Струменево–цементацийні елементи, що виконані в **лесових сунісках**:

- максимальна зона впливу на навколишній ґрунтовий масив – 10 см;
- зміна фізико-механічних характеристик зразків в зоні впливу: питоме зчеплення збільшилося на 13 %, кут внутрішнього тертя збільшився на 11 %, модуль деформації ґрунту збільшився на 50 %, знизилися значення просідання ґрунту;
- значення міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 3,6...12,3 МПа.

Струменево–цементацийні елементи, що виконані в **суніску пилуватому**:

- зони максимального впливу на навколишній ґрунтовий масив 15 і 30 см;
- в міжколонному просторі простежується ущільнення ґрунту на значення в діапазоні від 4 до 8 %;
- значення міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 10,2...14,3 МПа.

Струменево-цементацийні елементи, що виконані в *техногенних ґрунтах шлаках доменного виробництва*:

- мінімальна міцність цементно-шлакового матеріалу за результатами лабораторного випробування склала 7,3 МПа, максимальна – 11,2 МПа.

Ґрунтуючись на дослідних даних виконання ґрунтоцементних елементів в різних інженерно-геологічних умовах, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів міцності на стиск і побудовано графік з діапазонами значень міцності. Отримані значення в подальшому дозволять використовувати значення міцності при проєктуванні конструкцій з використанням ґрунтоцементних елементів.

Аналізуючи дослідні дані, доведено змінення фізико-механічних властивостей ґрунту, що оточує струменево-цементацийний елемент та показано графічно наявність зони покращеного ґрунту. Підтверджені експериментальні дані дозволять дослідити змінення напружено-деформованого стану масиву ґрунту з елементами підсилення, виконаними за струменевою технологією з включенням в розрахунок покращених зон ґрунту.

Дослідні дані з формування зони покращеного ґрунту навколо виконаної ґрунтоцементної колони дали підставу для вирішення наступного завдання дисертаційної роботи – моделювання впливу високонапірного струменя на оточуюче середовище з різними типами ґрунтів.

Для виконання числового моделювання утворення в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико-механічними характеристиками виконано гідравлічний розрахунок затопленого струменя цементного розчину. Використовуючи дослідні дані з описаних будівельних майданчиків і знаючі руйнуючий радіус струменя, розраховано залишковий тиск, що спричиняє

високонапірний струмінь цементного розчину на оточуючий ґрунтовий масив після того, як руйнуюча енергія буде затрачена на руйнування та виніс ґрунту в процесі формування ґрунтоцементної колони.

Отримані розрахункові данні залишкового тиску використано для створення моделі в програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

У відповідності до дослідних даних, зони впливу на оточуюче ґрунтове середовище дорівнювали 15 та 30 см (об'єкт "Реконструкція Андріївської церкви"), при моделюванні отримано такі результати, як 29,5 та 26,5 см. В результаті моделювання впливу виконання ґрунтоцементних колон отримано значення змінення щільності ґрунту із зони впливу –  $1,65 \text{ т/м}^3$  (до впливу струменя  $1,60 \text{ т/м}^3$ ), що відповідає дослідним даним (зміна щільності ґрунту після виконання ґрунтоцементних колон на будівельному майданчику варіювалась від  $1,64$  до  $1,67 \text{ т/м}^3$ ).

Опираючись на результати моделювання та порівняння їх з дослідними даними з будівельного майданчика, розрахункова модель кінцевих елементів застосована для інших основних ґрунтових умов території України.

Проаналізувавши отримані результати відмічено, що найбільший вплив на оточуючий ґрунт при виконанні ґрунтоцементної колони за струменевою технологією, отримано в пісках середньої щільності – 37,5 см, найменший в твердих глинах – 15 см. Переміщення в пісках середньої щільності склало 15 мм, а найменші значення в глинах твердих та суглинках твердої консистенції 1–2 мм.

Аналізуючи отримані результати зроблено висновок, що не зважаючи визначення деяких авторів про відсутність впливу високонапірного струменя за межами сформованої ґрунтоцементної колони, даною роботою доведено експериментальним та шляхом моделювання, що в різних ґрунтових умовах зона ґрунту з поліпшеними фізико-механічними характеристиками варіюється від 10 до 30 см.

На розрахунковій моделі підсилення ґрунтової основи існуючої будівлі показано покращуючий ефект введення зони поліпшеного ґрунту, що дало

змогу зменшення проєктної кількості ґрунтоцементних колон на 15%. Відповідно зменшаться матеріали на виконання струменево-цементацийних елементів, що дасть суттєве зменшення вартості будівельних робіт.

При вивченні застосування технології струменевої цементації в різних типах ґрунтів на території України дослідними даними дисертаційної роботи підтверджено не тільки вдале використання ґрунтоцементних елементів для армування ґрунтових масивів, але й доведено про наявність зон покращеного ґрунту навколо струменево-цементацийних колон.

Розглянутий широкий діапазон ґрунтів не включає в себе скельні та напівскельні ґрунту, оскільки виконання ґрунтоцементних елементів за струменевою технологією є проблематичним. Потужності високонапірного струменя цементного розчину не достатньо щоб сформувати ґрунтоцементний елемент заданих геометричних параметрів. Тому в таких будівельних умовах постає питання поєднання геотехнологій, що буде розглянуто в наступному розділі.

Основні положення цього розділу викладені у наступних публікаціях здобувача: вивчення водонепроникних характеристик ґрунтоцементного матеріалу викладені в роботі [12], дослідження впливу виконання елементів струменевої цементації на оточуючий ґрунтовий масив в роботах [26, 28], виконання ґрунтоцементних колон в техногенних ґрунтах, шлаках доменного виробництва в [13], в заторфованих суглинках в роботі [28], аналіз значень міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу в [13, 28, 31, 75].

## РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ СКЛАДНО-КОМПОНЕНТНИМИ СИСТЕМАМИ

#### 4.1 Особливості поєднання технологій струменевого ін'єктування та Ішебек Титан (Ischebeck Titan)

В результаті досліджень в розділах 2 та 3 було описано низку переваг струменевої геотехнології, але в складних інженерно-геологічних умовах (наприклад, напівскельні ґрунти) виконання ґрунтоцементних елементів стає неможливим. Тому для випадків, коли струменова цементация не вирішує всі поставлені завдання, пропонується поєднувати геотехнології для створення складно-компонентних систем, особливо для підсилення основ існуючих будівель з наявними прошарками напівскельного ґрунту.

У сучасному мегаполісі підсилення основи фундаментів існуючих будівель не є рідкістю. Причинами виконання підсилення є реконструкція, нерівномірні осідання, що виникли внаслідок будівництва поруч з існуючою будівлею нової, недосконалості комунікацій та ін.

Будівельні технології надають широкий вибір методів з підсилення ґрунтової основи: підведення нових фундаментів, цементна ін'єкція, хімічне закріплення, виконання ґрунтоцементних елементів за струменевою геотехнологією та ін. Інженер-проектувальник, зіткнувшись з проблемою розробки проекту з підсилення, може вибрати будь-яку з існуючих технологій в залежності від інженерно-геологічних умов, конструкції будівлі, можливості виконання робіт та наявності підземних комунікацій.

Виконання ж підсилення нової будівлі є нечастим явищем, адже при проектуванні повинні були бути виконані не тільки розрахунки міцності конструкцій і фундаментів, а й розраховані можливі осідання, а так само враховані усі можливі фактори негативного впливу на будівлю і ґрунтову основу. Але якщо нова будівля ще не введена в експлуатацію, а вже



спостерігаються наднормативні осідання, якщо при будівництві було виявлено невідповідність ґрунтової основи до результатів інженерно-геологічних вишукувань або на прилеглих територіях починається зведення нової будівлі, вплив якої не було враховано при проєктуванні, то ми стикаємося з підсиленням ґрунтової основи будівлі ще до початку її експлуатації.

В розділі розглянуто моделювання способу підсилення основи нового багатоповерхового будинку, де при проєктуванні фундаментів не були враховані всі особливості інженерно-геологічної будови ґрунтової основи.

На прикладі моделювання можна побачити спільну роботу елементів підсилення, виконаних за двома різними технологіями – із застосуванням анкерних елементів типу Ischebeck Titan і ґрунтоцементних колон, виконаних за струменево-цементацийною технологією. В роботу елементів підсилення включено шар вапняку, розташований в основі, і виконано порівняльний аналіз поведінки будівлі до і після виконання підсилення.

Анкерні елементи або палі, що самозабурюються (типу Ischebeck Titan) є різновидом паль і характеризуються малим діаметром (50–300 мм), а також способом влаштування шляхом забурювання в ґрунт трубчастих штанг, оснащених бурової коронкою, з одночасною і наступною ін'єкцією цементних розчинів різної консистенції.

Область застосування анкерних елементів дуже широка: кріплення котлованів, стабілізація зсувних схилів, кріплення днищ доків та опускних колодязів, кріплення опор або інших висотних споруд.

Анкерні елементи описаного типу мають широке розповсюдження на території Європи, а для України це досить нова геотехнологія.

Інструментом для моделювання взято програмний комплекс Plaxis 3D Foundation. Plaxis 3D – це розрахункова програма, що використовує схеми кінцевих елементів в тривимірній системі, розроблена спеціально для аналізу деформацій і стійкості в різних геотехнічних умовах [96].

Ідея методу кінцевих елементів полягає в тому, що розрахункова система замінюється (апроксимується) системою з кінцевим числом ступенів свободи,

тобто проводиться дискретизація системи на окремі елементи, з'єднані між собою у вузлах. Робота дискретизованої системи буде визначатися взаємодією окремих кінцевих елементів. Рішенням задачі визначення напружено-деформованого стану розрахункової системи методом кінцевих елементів буде такий напружено-деформований стан дискретизованої системи, при якому задовольняються умови сумісності та рівноваги.

Об'єктом вивчення є висотна будівля з каркасом з монолітного залізобетону (рис. 4.1). Максимальна висота будівлі складає 128 м (35 поверхів) з одним підземним поверхом. Розміри будівлі в плані – 23,8 м х 47,3 м. Фундамент – плита з монолітного залізобетону товщиною 2,2 м. Розміри фундаментної плити в плані – 29,8 м х 53,3 м. Безпосередньою основою фундаментної плити служить ІГЕ–1 – вапняк тріщинуватий, вивітрілий, з мушлями і піском, низької та середньої міцності, частково розм'якшений і частково не розм'якшений, потужністю під фундаментної плитою 3,5 м.

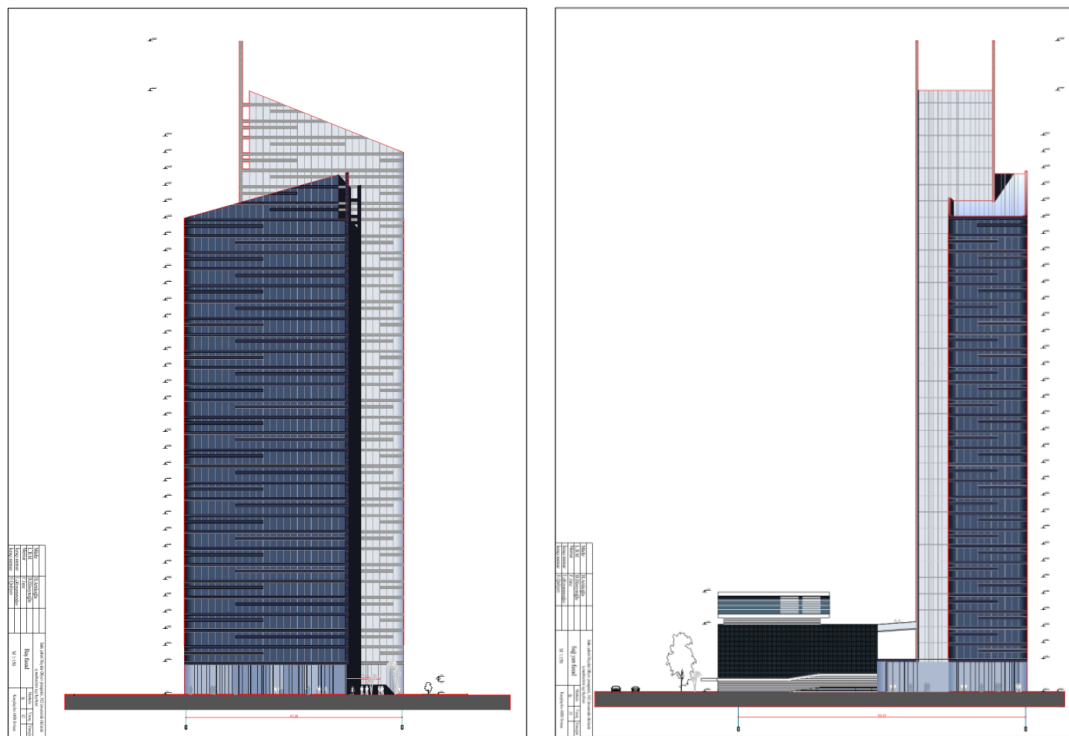


Рисунок 4.1 – Фасади висотної будівлі

Інженерно-геологічні умови майданчика будівництва висотної будівлі наведені в таблиці 4.1 та 4.2. Положення рівня ґрунтових вод на глибині 8.0...8,2 м від денної поверхні ґрунту.

ІГЕ–1 ( $Q_{11}$  hz) – жовто–бурий вапняк, тріщинуватий, вивітрілий, з мушлями і включеннями тонких прошарків піску по 1...5 см, низької і середньої міцності. Товщина шару – 5,9...6,4 м.

ІГЕ–2 ( $Q_{11}$  hz) – сіруватий невеликий водонасичений пісок з включенням битої мушлі і дрібного вапнякового щебеню, з тонкими прошарками глини, середньої щільності, вологий. Товщина шару – 1,8...2,0 м.

ІГЕ–3 ( $Q_{11}$  hz) – тугопластичний суглинок, синюватий, з частим включенням битої мушлі і прошарків піску. Товщина цього шару 1,6...2,2 м.

ІГЕ–4 ( $Q_{11}$  hz) – супісок пластичний (чергування піску з тонкими прошарками глини). Товщина шару – 6,4...6,7 м.

Таблиця 4.1 – Характеристики вапняка (ІГЕ–1)

№ n/n	Характеристики вапняка	Кількість визначень	Середнє значення	Мінімум– максимум
1	Питома вага (сухий зразок) $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	12	2,10	2,01–2,19
2	Опір одноосьовому стиску (сух.зразок) $R_s$ , кг/см <sup>2</sup>	8	85	73–101
3	Опір одноосьовому стиску (водонас.зразок) $R_s$ , кг/см <sup>2</sup>	5	73	57–86
4	Коеф. розм'якшення	–	0,86	–
5	Коеф. неоднорідності	–	0,17	–

Таблиця 4.2 – Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ n/n	Найменування ґрунту	$\rho^n$ , г/см <sup>3</sup>	$I_L$	$c^n$ , кг/см <sup>2</sup>	$\varphi^n$ , град	$E$ , кг/см <sup>2</sup>
ІГЕ–2	Мілкий водонасичений пісок з включенням битої мушлі та мілкого вапнякового щебеню, середньої щільності	1,65	–	0,03	34°	330
ІГЕ–3	Тугопластичний суглинок	1,93	0,40	0,22	21°	165
ІГЕ–4	Супісок пластичний	1,97	0,42	0,05	23°	206

При потужності шару вапняку, що складає 6 м, для отримання проєктної глибини розташування фундаментної плити було зрізано приблизно 2,5 м і в

основі залишено лише 3,5 м. Не було враховано, що потужність шару піску та тугопластичного суглинку не є великою, а пластичного супіску майже 7 м. Також важливим фактором є те, що вапняк – тріщинуватий низької та середньої міцності, а при водонасиченні втрачає міцність на 22%.

Схема навантажень, що діють по верхній поверхні фундаментної плити висотної частини будівлі, вказана на рисунку 4.2.

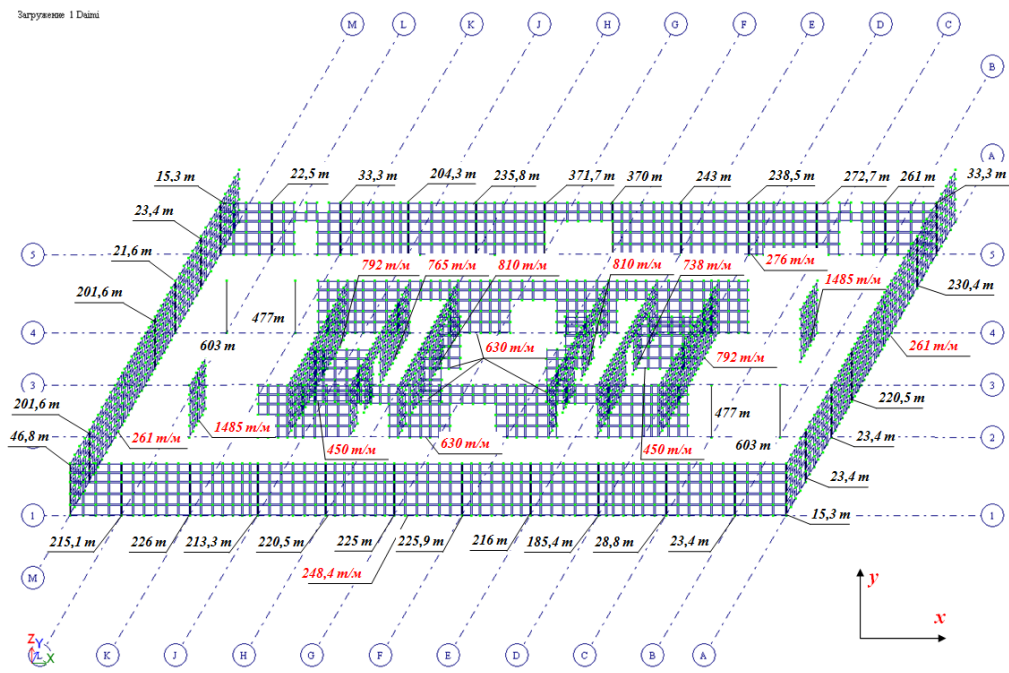


Рисунок 4.2 – Схема навантажень

Навантаження, що діють на фундаментну плиту, прийняті на основі розрахункової моделі висотного комплексу в форматі LIRA (рис. 4.2). За сейсмічною активністю, досліджуваний майданчик будівництва характеризується сейсмічним впливом у 8 балів. Максимальні сейсмічні навантаження, прикладені в рівні перекриттів (рис. 4.3, табл. 4.3):

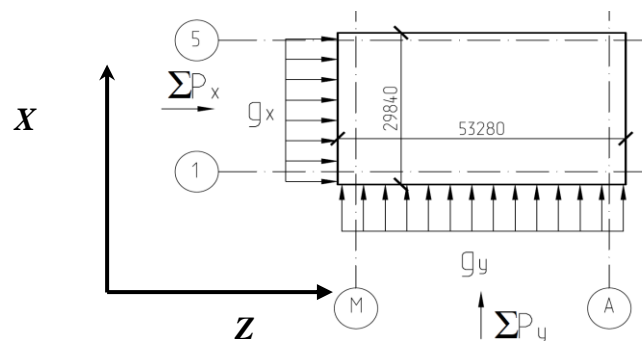


Рисунок 4.3 – Схема прикладання сейсмічного навантаження (для програми Plaxis навантаження по осі X – Z в моделі, по осі Y – X в моделі)

Таблиця 4.3 – Максимальні сейсмічні навантаження в рівні перекриттів

№ поверху	Завантаження 1		Завантаження 2	
	$g_x = \Sigma P_x / l, \text{ Т/М}$	$g_y = \Sigma P_y / l, \text{ Т/М}$	$g_x = \Sigma P_x / l, \text{ Т/М}$	$g_y = \Sigma P_y / l, \text{ Т/М}$
1	0,33	0,3	0,11	0,2
2	2	0,3	0,11	1
3	2,3	0,3	0,11	1,2
4	3,7	0,3	0,11	1,7
5	4,8	0,3	0,11	2,2
6	5,9	0,3	0,11	2,8
7	6,7	0,3	0,11	3,2
8	7,7	0,3	0,11	3,7
9	8,6,	0,3	0,11	4,2
10	9,4	0,3	0,11	4,6
11	9,5	0,3	0,11	4,7
12	10	0,3	0,11	5
13	10,5	0,3	0,11	5,3
14	11,5	0,3	0,11	5,5
15	11	0,3	0,11	5,6
16	10	0,3	0,11	5,4
17	9,7	0,3	0,11	5,3
18	9,2	0,3	0,11	5,1
19	8,5	0,3	0,11	4,8
20	7,5	0,3	0,11	4,4
21	6	0,3	0,11	3,8
22	5	0,3	0,11	3,7
23	3,5	0,3	0,11	3,2
24	2,1	0,3	0,11	2,5
25	0,7	0,3	0,11	1,8
26	1	0,3	0,11	1
27	2,4	0,3	0,11	0,2
28	3,5	0,3	0,11	0,8
29	3,6	0,3	0,11	1,3
30	6,7	0,3	0,11	2
31	6	0,3	0,11	3,2
32	7	0,3	0,11	5,3
33	7,5	0,3	0,11	3,8
34	8	0,3	0,11	3,8
35	8	0,3	0,11	4
36	2,7	0,3	0,11	4,4

Відповідно до описаних умов і поставлених завдань створено дев'ять моделей:

- *Модель 1.1.* Існуючі умови (перед виконанням підсилення основи).
- *Модель 1.2.* Існуючі умови. Зрушуюче навантаження по осі Z
- *Модель 1.3.* Існуючі умови. Зрушуюче навантаження по осі X
- *Модель 2.1.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами.
- *Модель 2.2.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами. Зрушуюче навантаження по осі Z
- *Модель 2.3.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами. Зрушуюче навантаження по осі X
- *Модель 3.1.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються.
- *Модель 3.2.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються. Зрушуюче зусилля по осі Z.
- *Модель 3.3.* Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються. Зрушуюче навантаження по осі X.

В *Моделях 1.1...1.3* враховано: конструктив будівлі, всі навантаження на фундаментну плиту і змодельовано існуючу ґрунтову основу, тобто реальний стан досліджуваної будівлі до виконання підсилення.

В *Моделях 2.1...2.3*: передбачається, що по периметру фундаментної плити висотної будівлі виконуються ґрунтоцементні елементи у вигляді колон.

В *Моделях 3.1...3.3*: по периметру фундаментної плити висотної будівлі виконуються ґрунтоцементні елементи у вигляді колон, які мають створити під шаром вапняку додатковий упор по периметру фундаменту. Анкерні елементи типу Ischebeck Titan повинні зв'язати фундаментну плиту будівлі з монолітного залізобетону товщиною 2,2 м і нижній шар вапняку потужністю 3,5 м в один двошаровий масив підвищеної жорсткості, що працює спільно.

Покращений складений фундамент будівлі (залізобетонна плита фундаменту + шар вапняку) буде працювати як плита підвищеної жорсткості, обперта на ряд колон по чотирьох сторонах, що зменшить загальне осідання будівлі і мінімізує можливість виникнення наднормативного крену.

Грунтоцементні елементи у вигляді колон діаметром 1,0 м задані довжиною 10,8 м (в межах відміток від  $-9,2$  м до  $-20,0$  м) з кроком 1,6 м. Грунтоцементні колони влаштовуються на консольній частині фундаментної плити за межами будівлі, що не призведе до порушення міцності самої фундаментної плити при бурінні свердловин, оскільки вони будуть розташовані в зоні практично нульових зусиль в плиті.

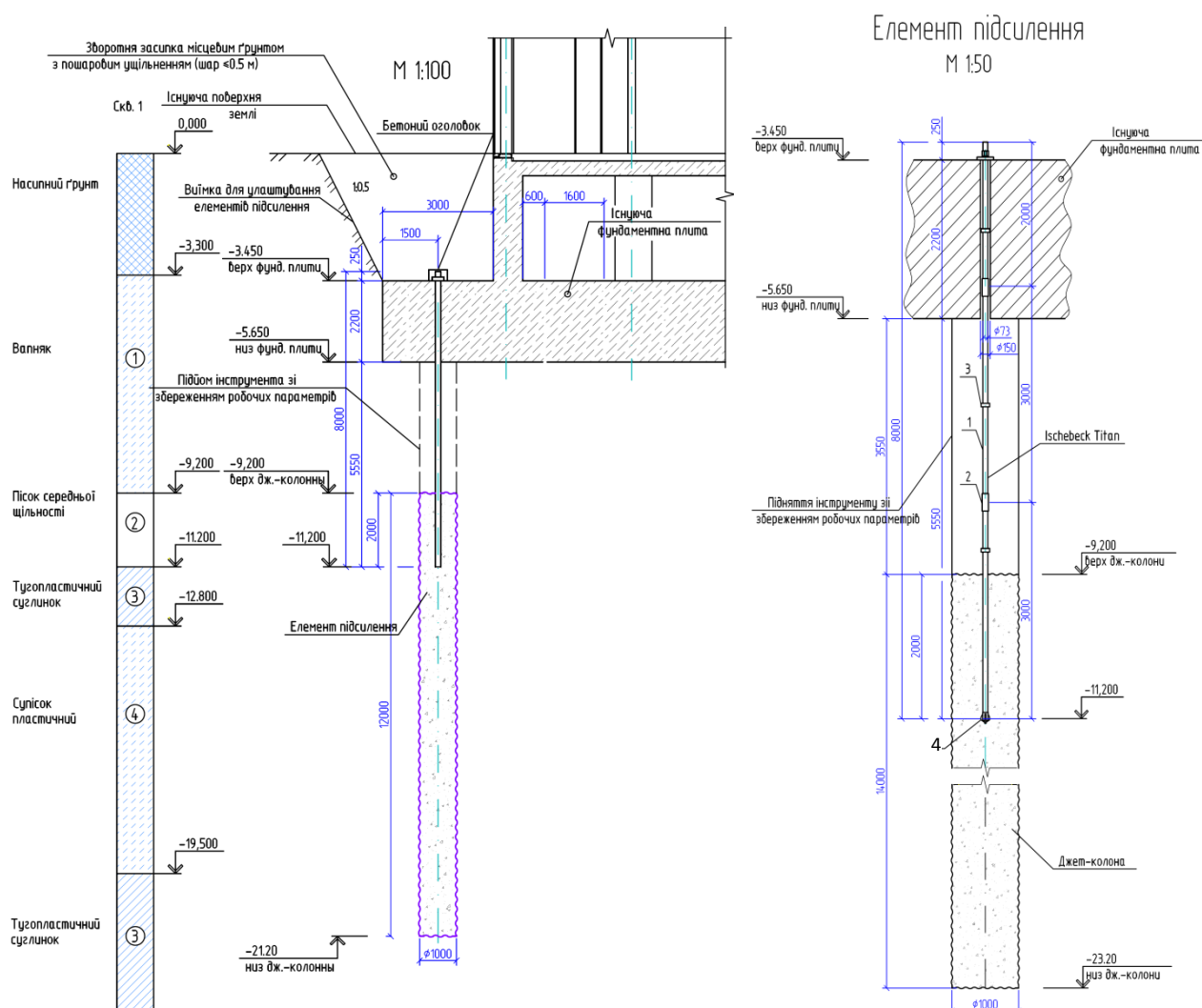


Рисунок 4.4 – Схема створення багатокомпонентного елемента підсилення:

- 1 – буроін'єкційна штанга 73/35 мм,
- 2 – з'єднувальна муфта  $\varnothing 95$  мм,
- 3 – центратор  $\varnothing 130$  мм,
- 4 – хрестоподібна бурова коронка  $\varnothing 130$  мм

Анкерні елементи типу Ischebeck Titan виконуються через ті ж свердловини в фундаментній плиті, що і колони, тобто з кроком 1,6 м. Довжина анкерних елементів прийнята рівною 8,0 м (в межах відміток від –3,45 м до –11,45 м). Анкерні елементи встановлюються відразу ж після закінчення робіт з влаштування колон (рис. 4.4).

*Технологія виконання комбінованих елементів підсилення:*

1. Виконання виїмки ґрунту захватками для доступу до фундаментної плити.

2. Свердління отворів 150 мм в залізобетонній фундаментній плиті.

3. Виконання ґрунтоцементної колони:

3.1 Буріння буровою коронкою, розташованою на гідромоніторі, до проєктної відмітки низу колони.

3.2 Подача цементного розчину з В/Ц=1 від високонапірного насосу до гідромонітору під тиском 450 атм., витратою розчину 100 л/хв.

3.3 Покроковий підйом гідромонітору з обертанням з наступним руйнуванням ґрунту.

3.4 Винесення частини зруйнованого ґрунту з відпрацьованим цементним розчином (пульпою) на поверхню з подальшим спрямуванням його до пульпоприймача.

3.5 Формування ґрунтоцементної колони до нижньої відмітки шару вапняку.

4. Продовження підйому гідромонітору в зоні шару вапняку зі збереженням робочих параметрів (тиску та витрат цементного розчину), що дозволить вимити піщаний заповнювач тріщинуватого вапняку та заповнити тріщини цементним розчином.

5. Без перерви в процесі виконання елементу підсилення виконується опускання конструкції палі, що самозабурюється, тобто анкерного елементу типу Ischebeck Titan, який складається з буроін'єкційних штанг, з'єднаних між собою муфтами та буровою коронкою до проєктної відмітки низу анкерного елементу.



6. Нагнітання цементного розчину з  $V/C=0,4$  через бурові штанги анкерного елемента виконується до появи розчину на поверхні фундаментної плити.

7. Фіксування анкерного елемента сферичною гайкою.

8. Формування бетонного оголовку з бетону C35/40 для закриття голови анкерного елемента.

9. Після виконання елементів підсилення виконується пошарова зворотна засипка ґрунтом з пошаровим ущільненням шарами не більше 0,5 м.

## 4.2 Обґрунтування вибору моделі

Для вирішення поставленого завдання за допомогою програми Plaxis 3D Foundation була створена тривимірна модель всього комплексу висотної будівлі з дотриманням поверховості. Основні елементи розрахункової схеми: конструкція будівлі представлена в моделі елементами "walls" для внутрішніх і зовнішніх стін, "floors" для перекриттів і фундаментної плити. Модель для дослідження ґрунтової основи – Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model) [96].

*Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model)* описує пружно-ідеальну пластичну поведінку і лінійний критерій міцності матеріалів, міцність яких на стиск істотно перевищує міцність на розтяг. Цю модель можна називати універсальною, тому що вона лежить в основі багатьох модифікацій різних моделей, що описують поведінку і міцність цілого ряду матеріалів: ґрунтових і скельних порід, бетонів, композитних матеріалів та ін. [45].

Модель відображає лінійний характер руйнування і складається з двох компонент міцності:  $c$  – питоме зчеплення і  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя і описує залежність дотичних напружень (міцності на зрушення) від діючих нормальних напружень. У загальному вигляді дана модель представлена у вигляді нахилу лінії руйнування до осі напружень (абсциси)  $\sigma$  під кутом  $\varphi$

Модель Мора–Кулона включає в себе п'ять вхідних параметрів: модуль Юнга ( $E$ ), коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ ), зчеплення ( $c$ ), кут тертя ( $\varphi$ ) і кут ділатансії ( $\psi$ ).

За рекомендаціями Буличова Н. С. [1] для моделювання шару вапняку була обрана модель *Linear Elastic Model*, ґрунтуючись на припущенні, що пружність – основна властивість масивів гірських порід і основною механічною (математичною) моделлю масиву порід, що застосовується в механіці підземних споруд, є пружна модель.

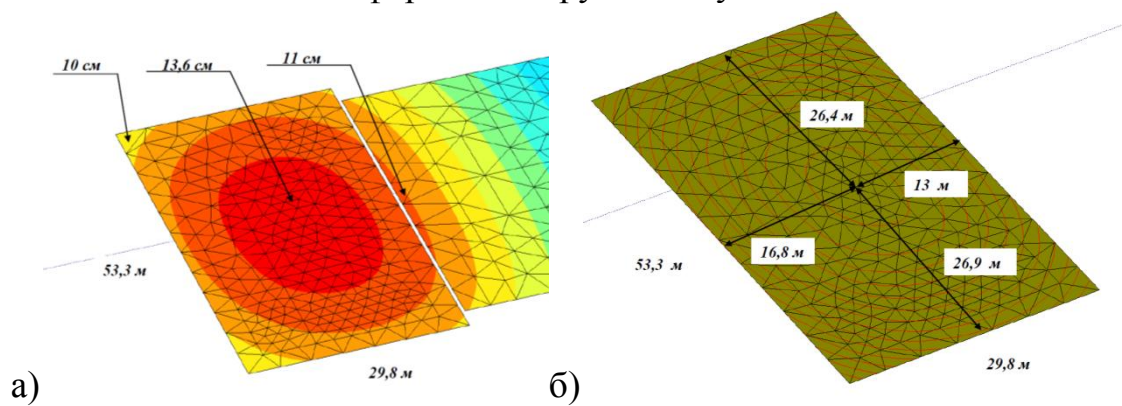
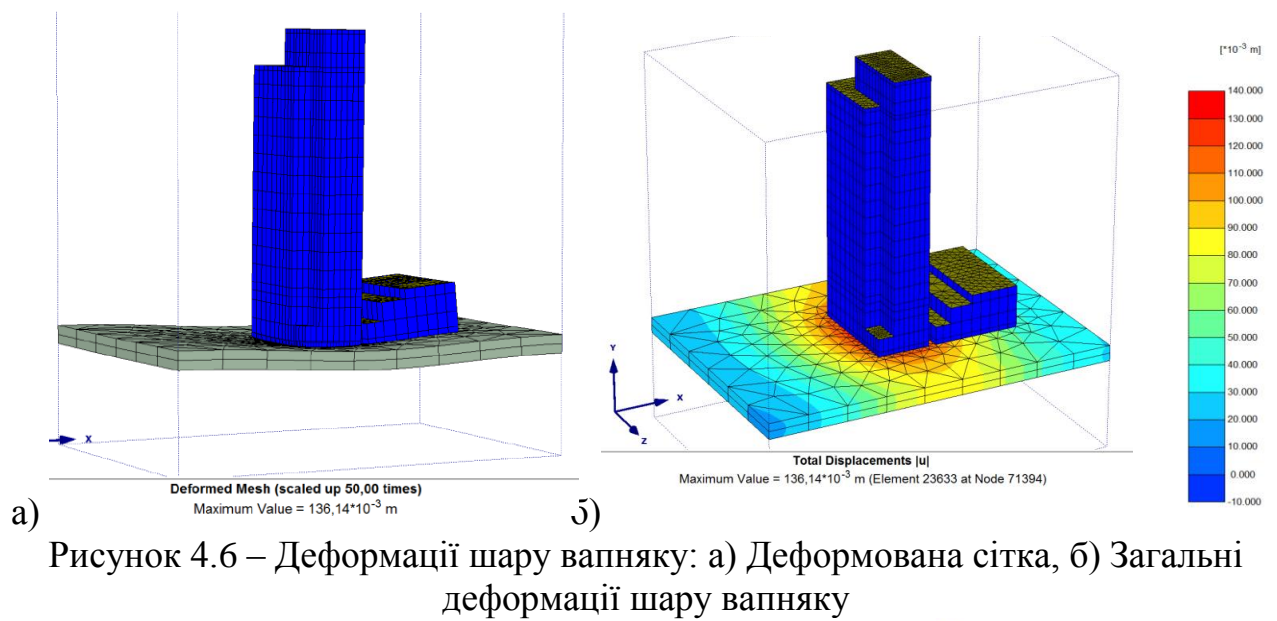
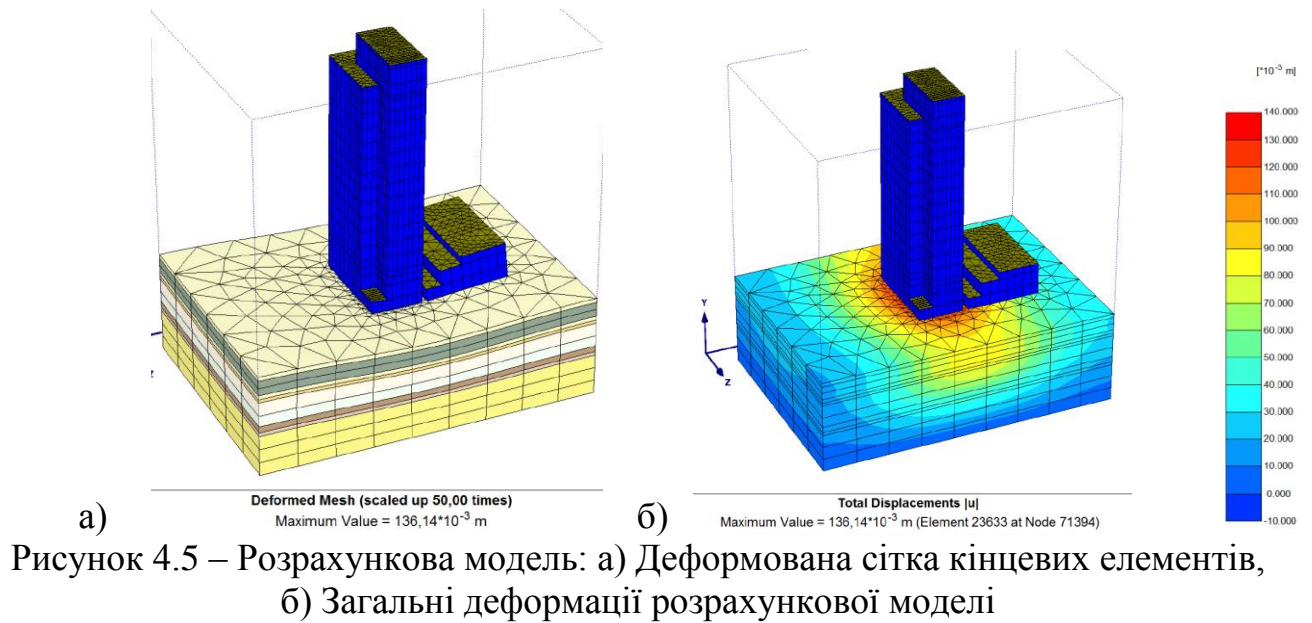
Так само моделлю *Linear Elastic Model* були змодельовані ґрунтоцементні елементи, виконані за технологією струменевої цементації.

В розрахункову модель включені зі своїми навантаженнями фундаментна плита висотної частини будівлі і фундаментна плита малоповерхової частини будівлі над підземним паркінгом. При такій побудові розрахункової моделі є можливість врахувати взаємний вплив висотної і малоповерхової частин будівлі, що, в свою чергу, дозволяє отримати більш реальну картину зміни напруженого стану ґрунтового масиву в основі фундаментної плити після будівництва висотної будівлі. Зміни напружено–деформованого стану основи під паркінгом та вивчення спільної роботи з поруч розташованою висотною будівлею в роботі не розглядаються.

Розрахункова модель має в плані розміри 125 м на 115 м, тобто від крайніх точок будівель, що розглядаються, відстані до границі моделі – 30 м. Глибина ґрунтової товщі заданої в моделі – 50 м. Висота будівлі – 119,40 м. Для створення розрахункової моделі були обрані 15–ти вузлові елементи, загальна кількість яких склала 36864 шт., а кількість вузлів – 107415 шт.

### 4.3 Результати моделювання

#### Розрахункова модель 1.1. Існуючі умови



Розрахункова модель 1.2. Існуючі умови. Зрушуючі навантаження по Z:

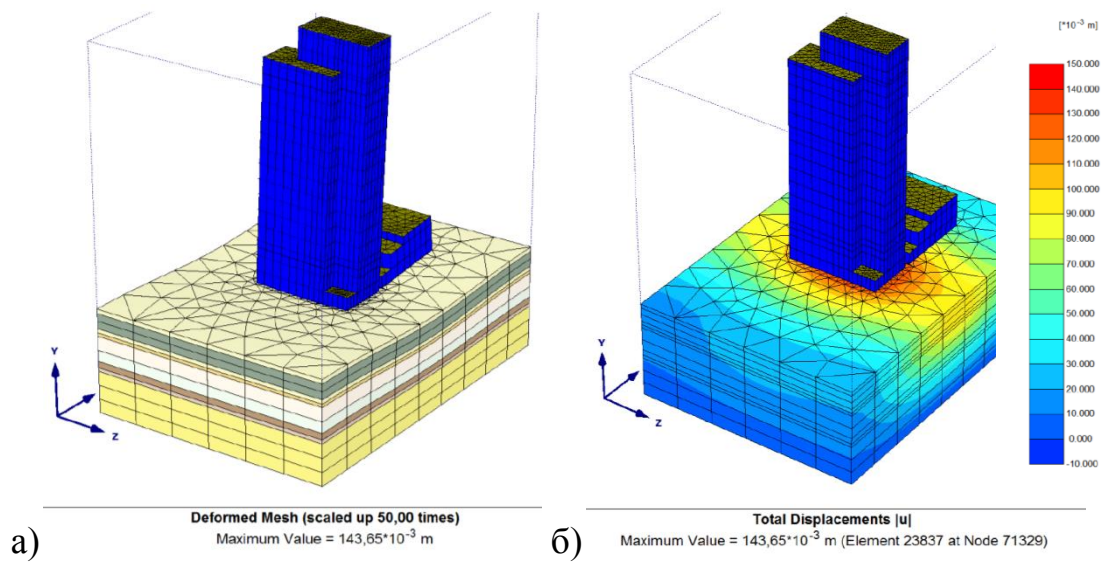


Рисунок 4.8 – Розрахункова модель: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації розрахункової моделі

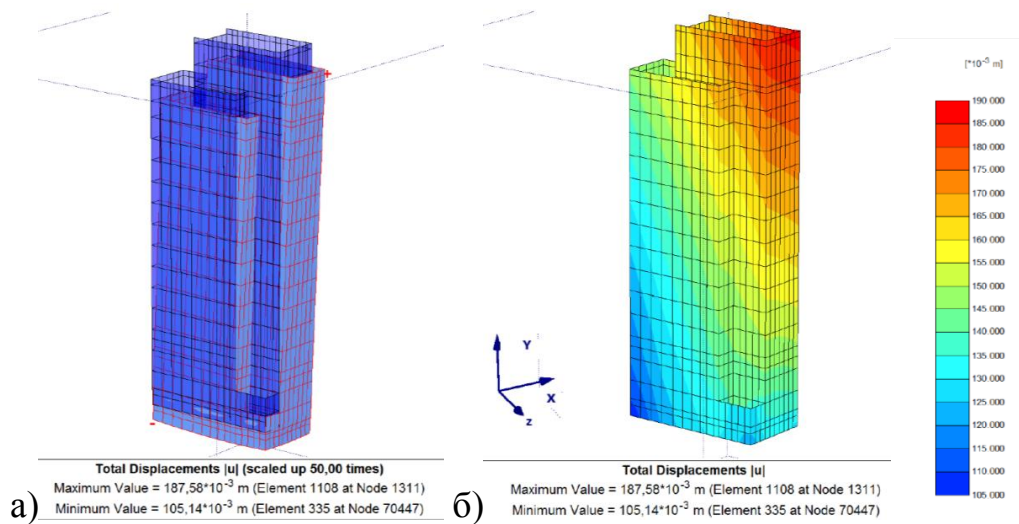


Рисунок 4.9 – Деформації будівлі: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації

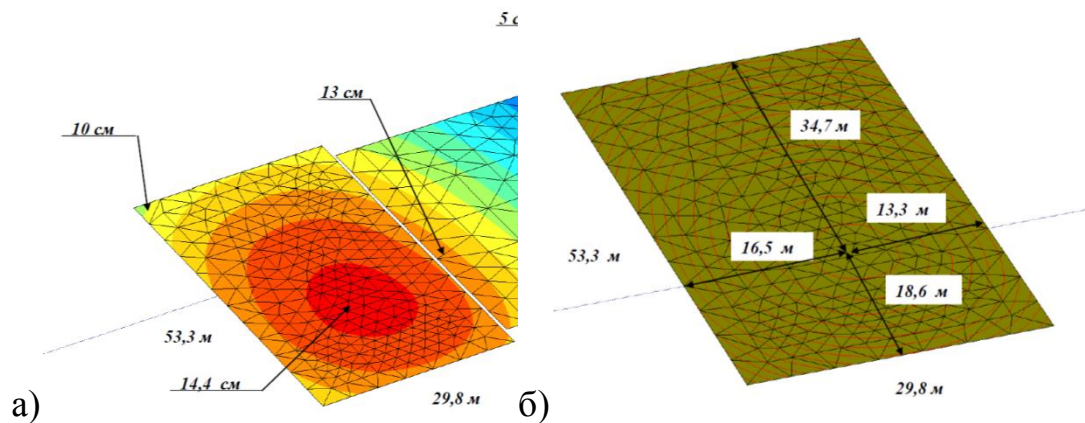


Рисунок 4.10 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень



Розрахункова модель 1.3. Існуючі умови. Зрушуючі навантаження по Х:

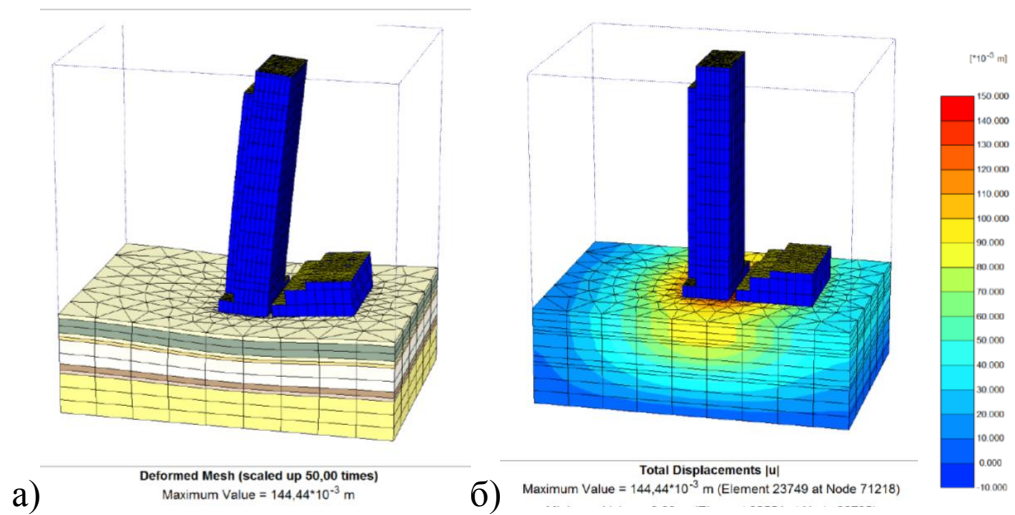


Рисунок 4.11 – Розрахункова модель: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації розрахункової моделі

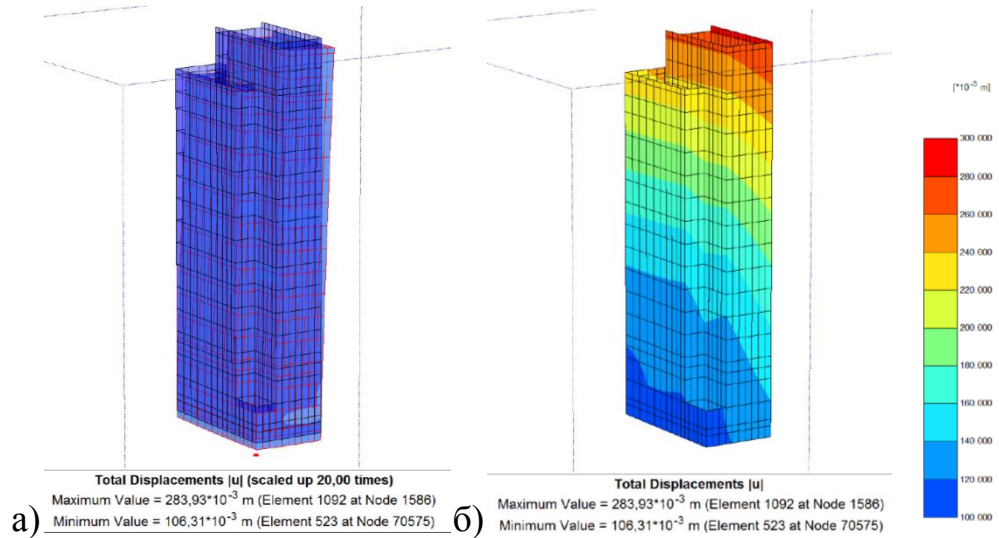


Рисунок 4.12 – Деформації будівлі: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації

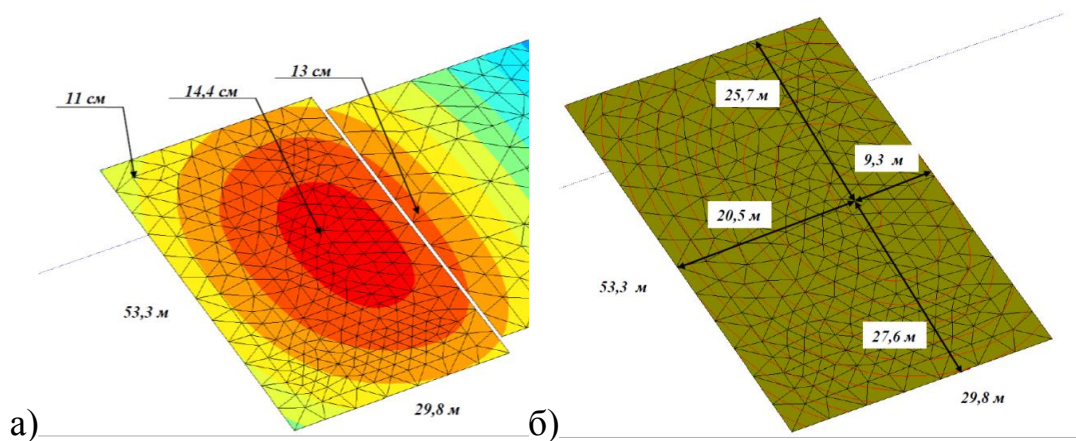
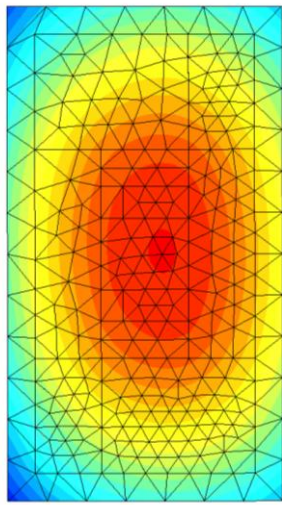
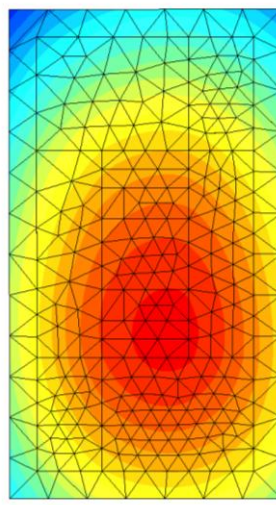


Рисунок 4.13 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень

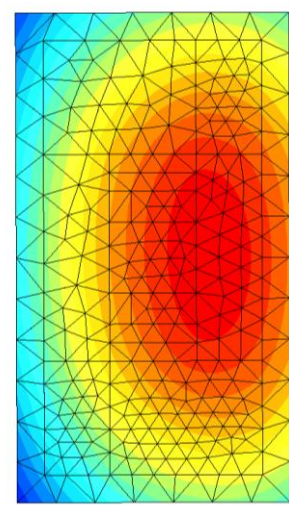
Розрахункова модель 1.1...1.3. Існуючі умови – Порівняння результатів



$\Delta_{\max}=136$  мм



$\Delta_{\max}=144$  мм (по вісі Z)



$\Delta_{\max}=144$  мм (по вісі X)

Рисунок 4.14 – Фундаментна плита. Загальні деформації

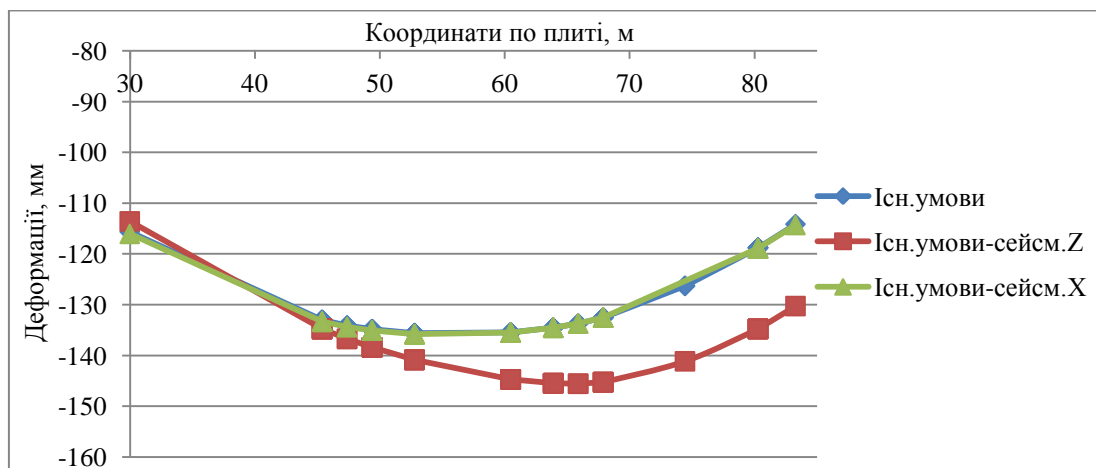


Рисунок 4.15 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

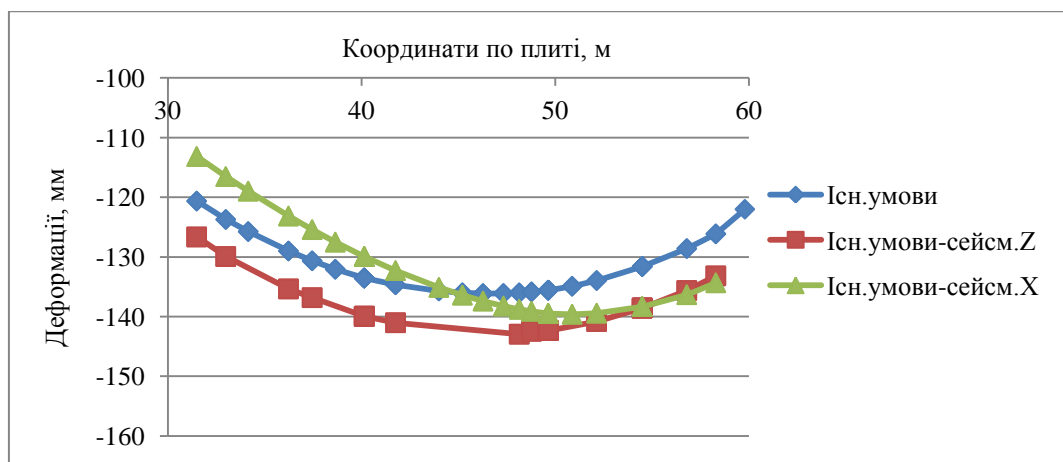


Рисунок 4.16 – Поперечний переріз по фундаментній плиті

За результатами, отриманими за допомогою *Моделі 1*:

– Максимальне кінцеве осідання фундаменту висотної частини будівлі в існуючому стані при дії навантажень основного сполучення, становить 136,1 мм, при прикладанні зрушуючого навантаження осідання збільшується до 144 мм.

– Максимальна деформація шару вапняку, потужністю 3,5 метра, що знаходиться безпосередньо під фундаментною плитою, складає 136,1 мм (рис. 4.7) і збігається з зоною максимальних осідань фундаменту. Це говорить про те, що деформації шару вапняку практично не відбувається, а все осідання фундаментної плити висотної частини будівлі формується як сумарне осідання шарів досить слабких дисперсних ґрунтів, що залягають нижче шару вапняку.

– Найгірша відносна різниця деформацій по площі фундаментної плити висотної частини будівлі (рис. 4.7) становить:

$$(\delta_s / L)_u = (0,136\text{м} - 0,100\text{м}) / 30,5\text{м} = 0,0012 < 0,0020$$

– При порівнянні результатів моделювання для варіантів з існуючим навантаженням та прикладеними зрушуючими навантаженнями по осям *Z* та *X* (рис. 4.14...4.16) спостерігається зміщення максимального поля навантажень, що в свою чергу, може призвести до виникнення нерівномірного крену. Відповідні висновки можна зробити з аналізу кривих на рисунках 4.15 та 4.16. Якщо при порівнянні кривих значень переміщення поперечного перерізу виділяється тільки показове зміщення центру максимальних осідань від дії зрушуючого навантаження, прикладеного по осі *Z*, то у поздовжньому перерізі по фундаментній плиті – найбільше зміщення центру від дії зрушуючого навантаження, прикладеного по осі *X*. Не зважаючи на те, що значення максимального осідання будівлі при дії зрушуючих навантажень однакові, необхідно враховувати найбільше зміщення центру максимальних деформацій та різницю зі значеннями осідань на крайніх точках фундаментної плити.



Розрахункова модель 2.1. Підсилення ґрунтоцementeментними колонами

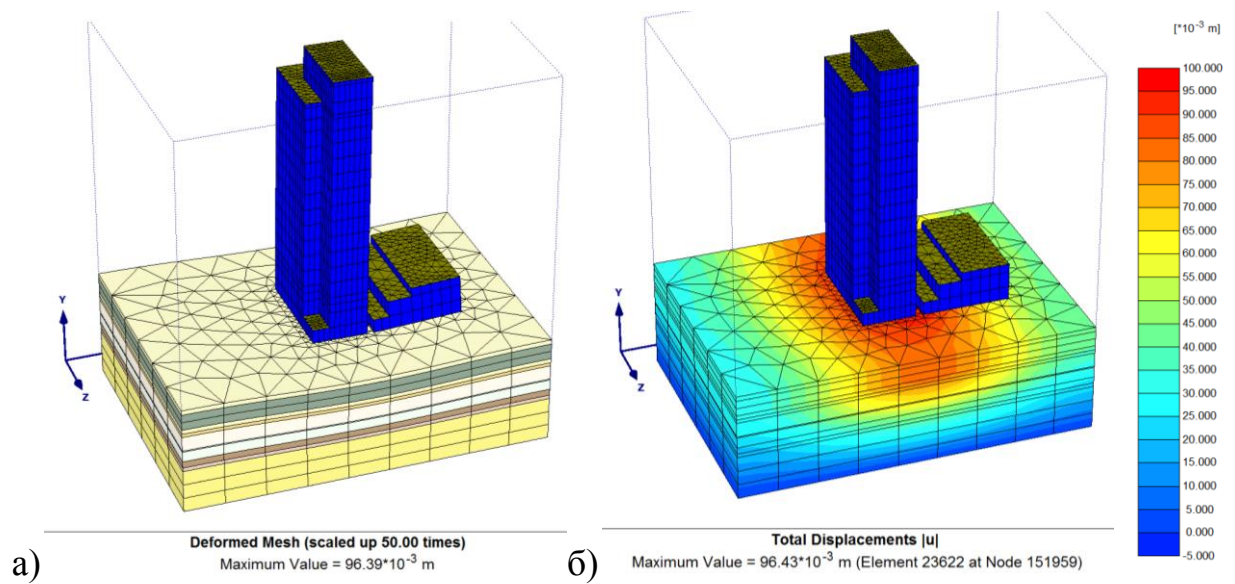


Рисунок 4.17 – Розрахункова модель: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації розрахункової моделі

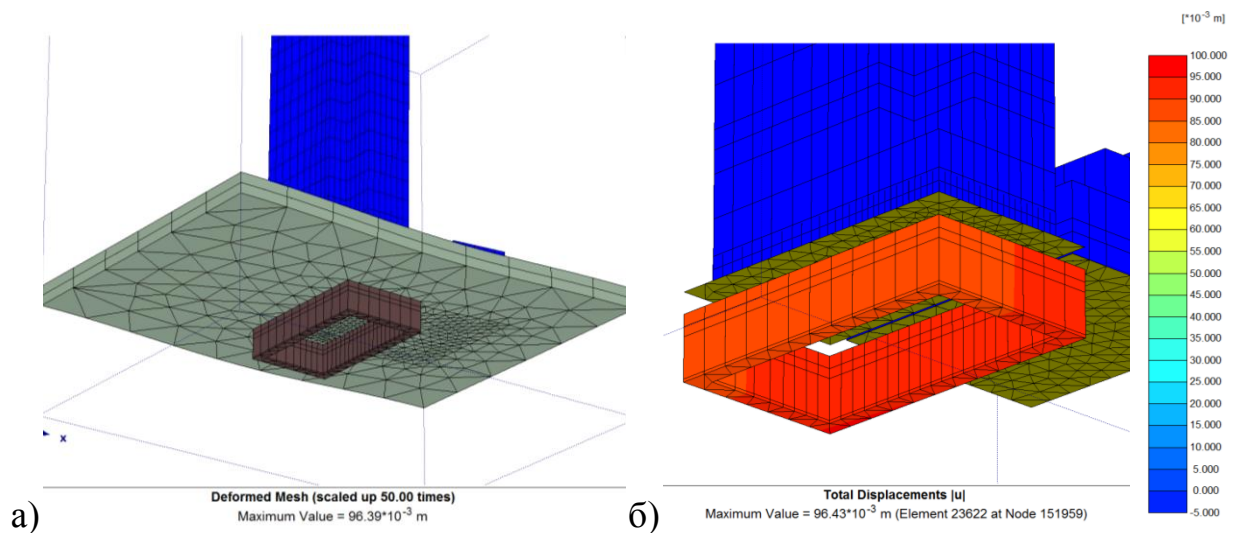


Рисунок 4.18 – а) Деформації шару вапняку, б) Загальні деформації колон

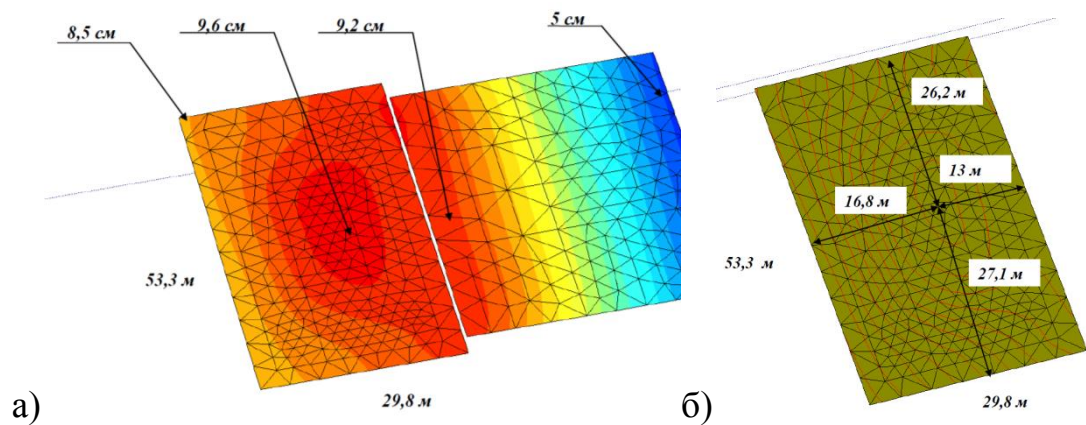


Рисунок 4.19 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень



Розрахункова модель 2.2. Підсилення ґрунтоцементними колонами – Зрушуючі навантаження по Z

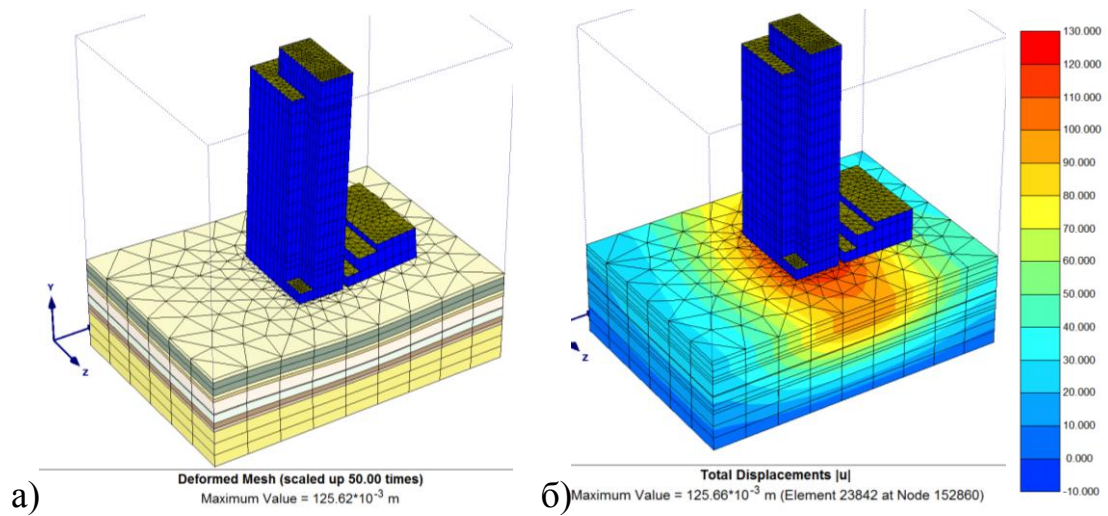


Рисунок 4.20 – а) Деформована сітка кінцевих елементів, б) Загальні деформації

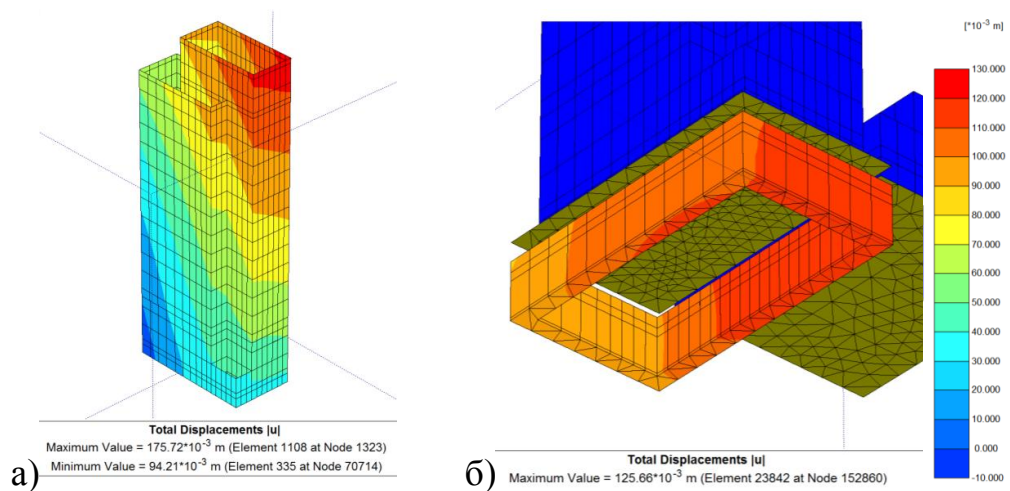


Рисунок 4.21 – а) Деформації будівлі, б) Загальні деформації елементів підсилення

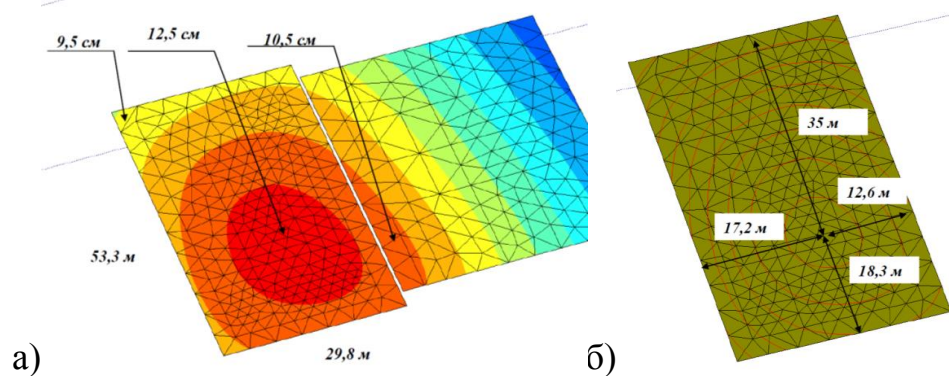


Рисунок 4.22 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень

Розрахункова модель 2.3. Підсилення ґрунтоцементними колонами —  
Зрушуючі навантаження по Х

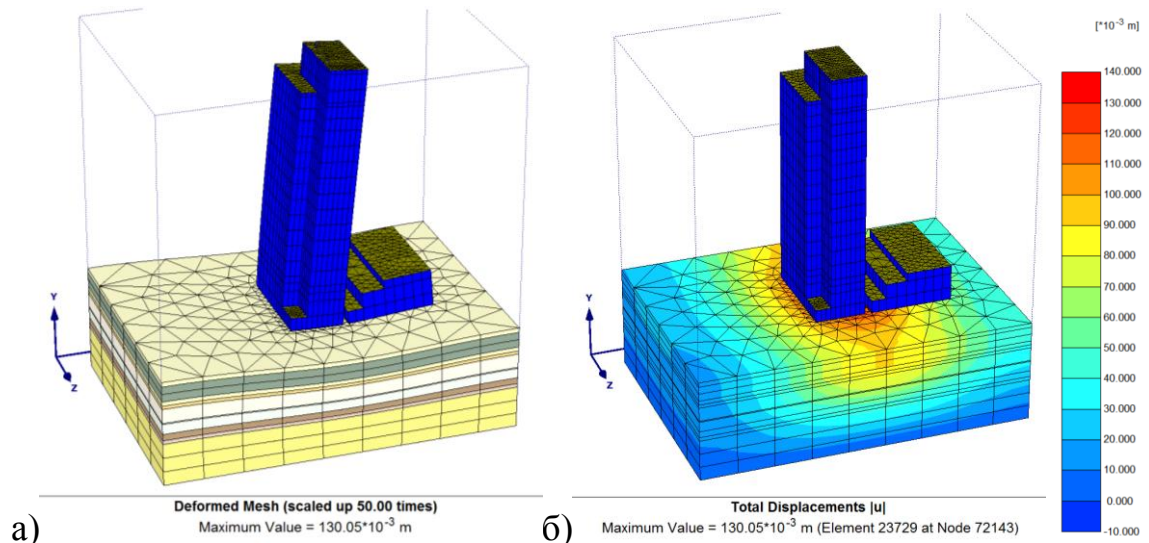


Рисунок 4.23 – а) Деформована сітка кінцевих елементів, б) Загальні деформації

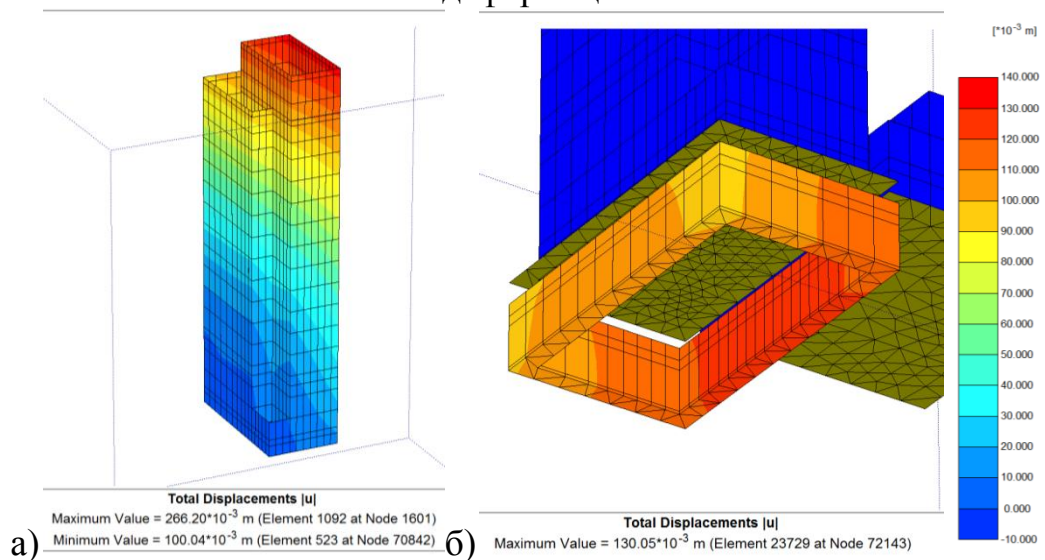


Рисунок 4.24 – а) Деформації будівлі, б) Загальні деформації елементів підсилення

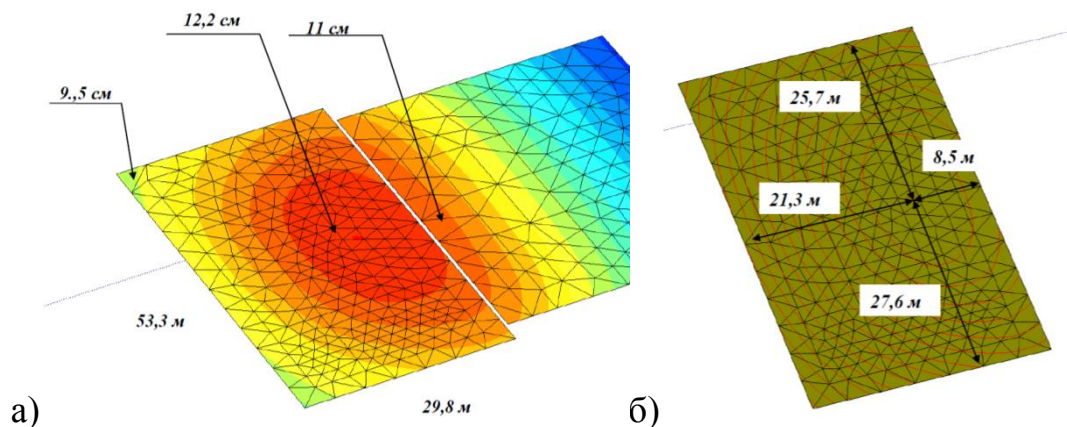


Рисунок 4.25 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень

Розрахункова модель 2.1...2.3. Підсилення ґрунтоцementeментними колонами –  
Порівняння результатів

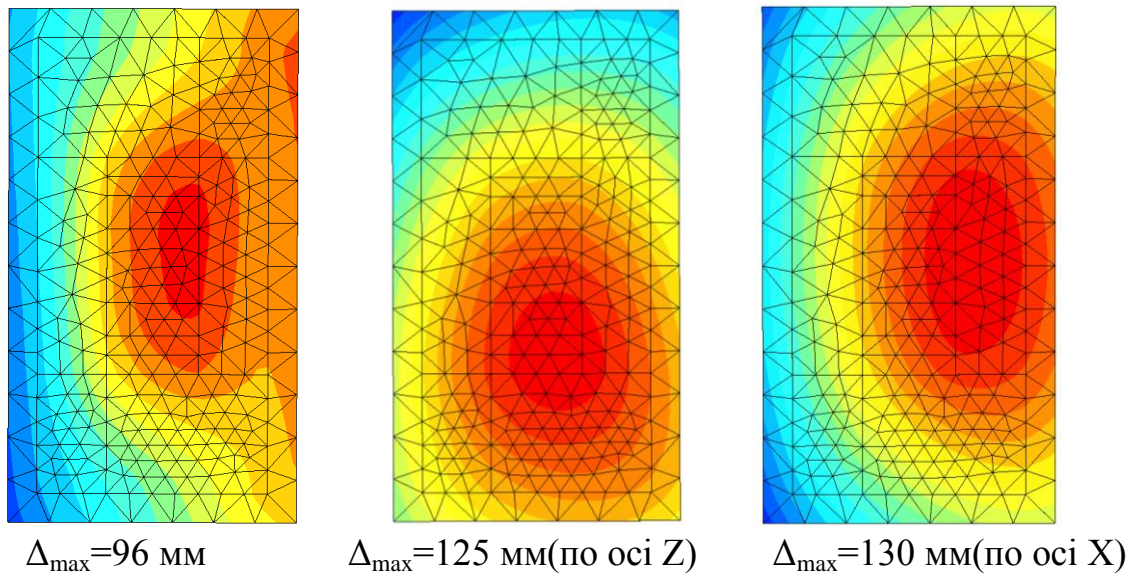


Рисунок 4.26 – Фундаментна плита. Загальні деформації

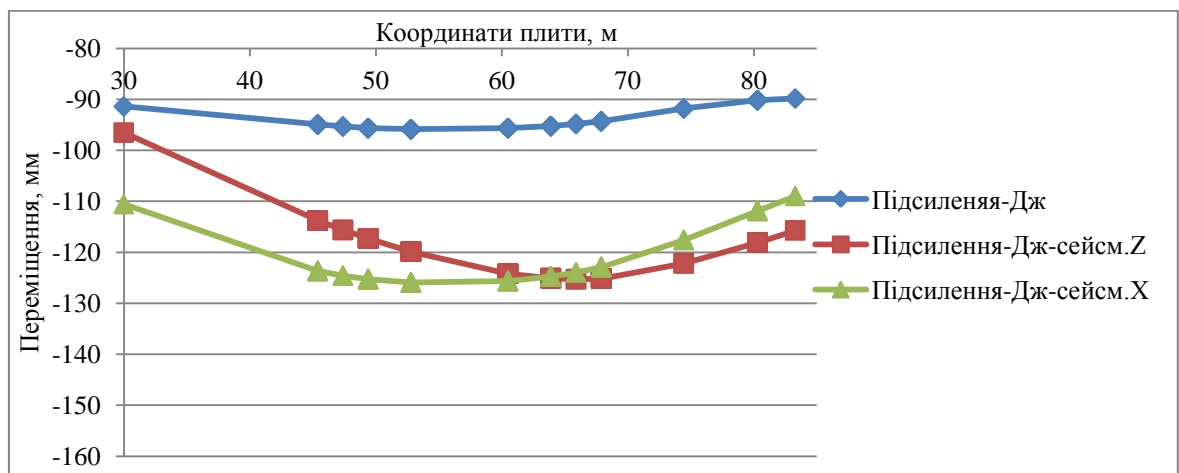


Рисунок 4.27 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

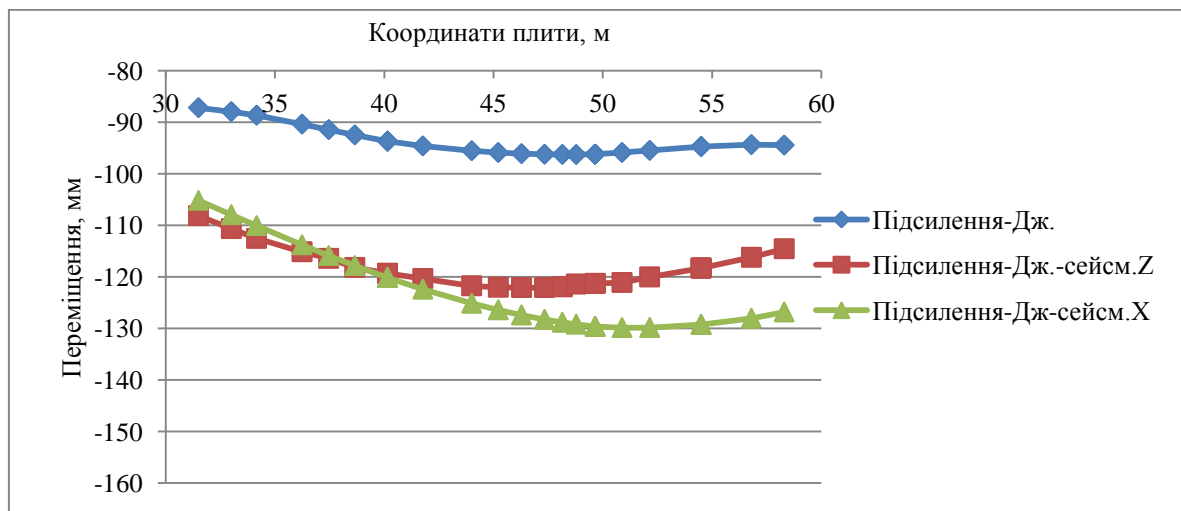


Рисунок 4.28 – Поперечний переріз по фундаментній плиті



За результатами, отриманими за допомогою *Моделі 2*, де змодельовано підсилення тільки ґрунтоцементними колонами:

– Максимальне кінцеве осідання фундаменту висотної частини будівлі зменшилося до 96 мм (рис. 4.19), при прикладанні зрушуючого навантаження осідання склали 125 та 130 мм (рис. 4.22 та рис. 4.25), що вказує на те, що ґрунтоцементні колони чудово працюють при підсиленні ґрунтового масиву в основі будівлі, але їх недостатньо при навантаженні, що виникають при сейсмічному впливі.

– Найгірша відносна різниця деформацій по площі фундаментної плити висотної частини будівлі (рис. 4.25) становить:

$$(\delta_s / L)_u = (0,130\text{м} - 0,095\text{м}) / 30,5\text{м} = 0,0011 < 0,0020$$

– Криві переміщення фундаментної плити при різних варіантах навантаження на рисунках 4.27 та 4.28 показують, що виконання ґрунтоцементних колон в ґрунтовій основі дозволяє вирівняти осідання та зменшити їх, але при прикладанні зрушуючого навантаження по осям Z та X, можна спостерігати не тільки зміщення максимального поля навантажень, але й збільшення осідання.

Розрахункова модель 3.1. Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються

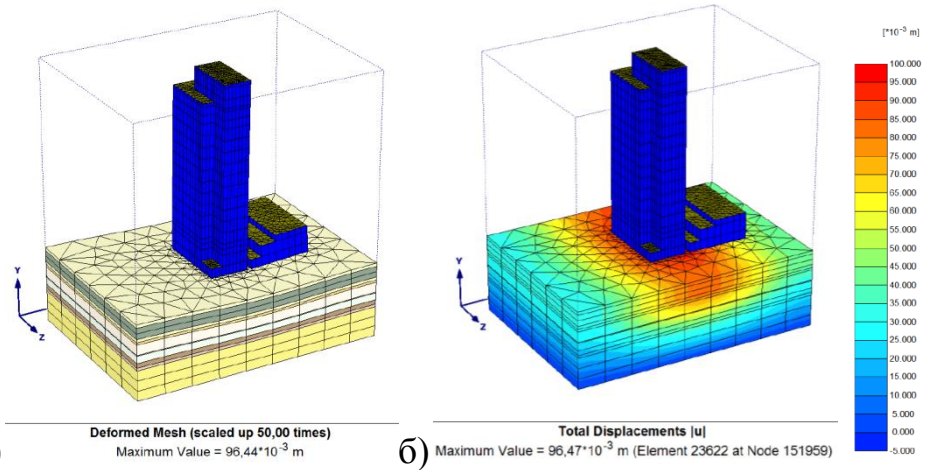


Рисунок 4.29 – а) Деформована сітка кінцевих елементів, б) Загальні деформації

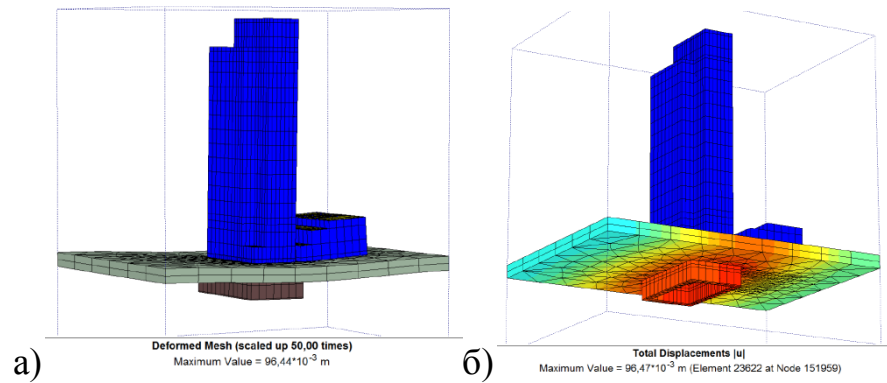


Рисунок 4.30 – Деформації шару вапняку та ґрунтоцементних колон: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації

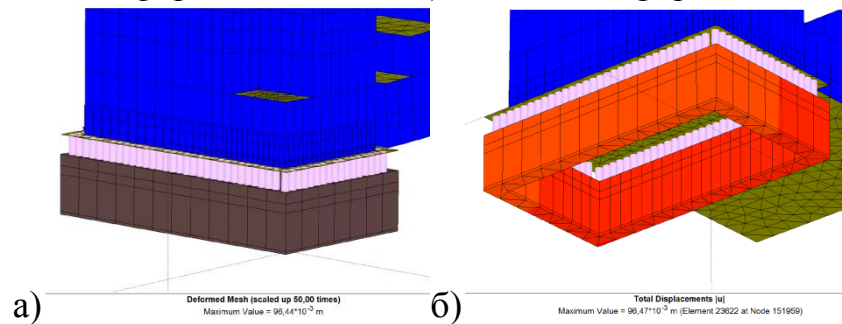


Рисунок 4.31 – Складно-компонентна система підсилення: а) Деформована сітка, б) Загальні деформації

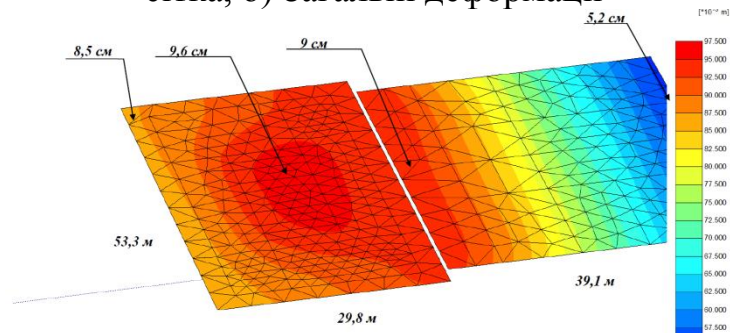


Рисунок 4.32 – Максимальні переміщення фундаментної плити

Розрахункова модель 3.2. Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються. Зрушуючі навантаження по Z

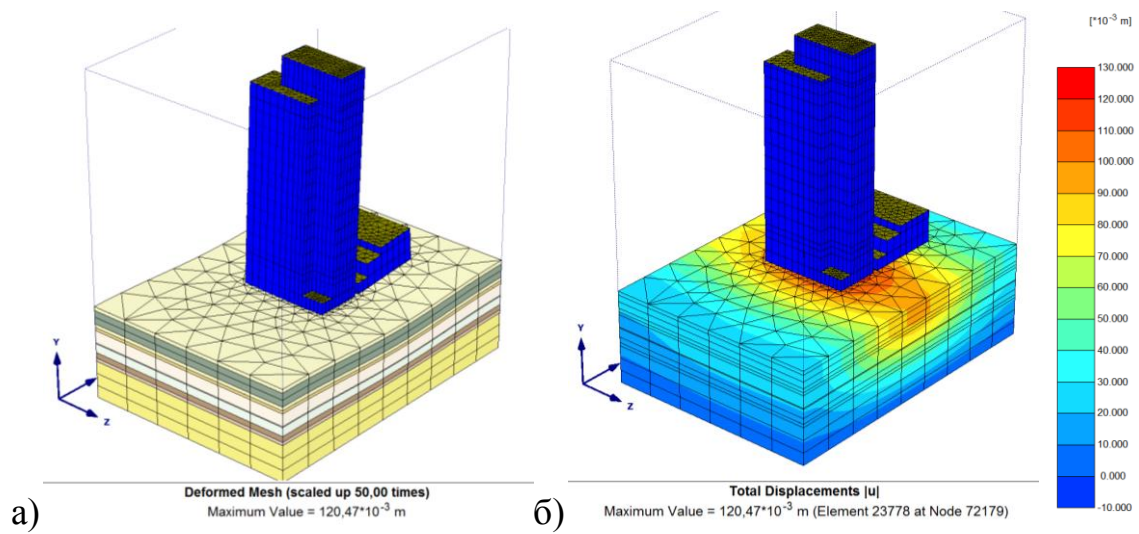


Рисунок 4.33 – а) Деформована сітка кінцевих елементів, б) Загальні деформації

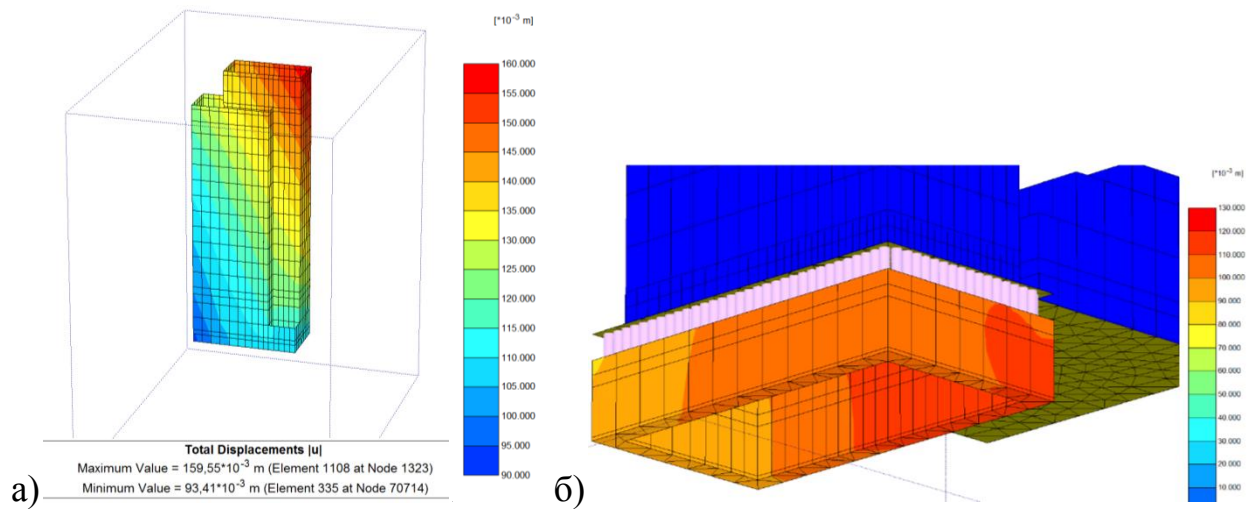


Рисунок 4.34 – а) Деформації будівлі, б) Загальні деформації елементів підсилення

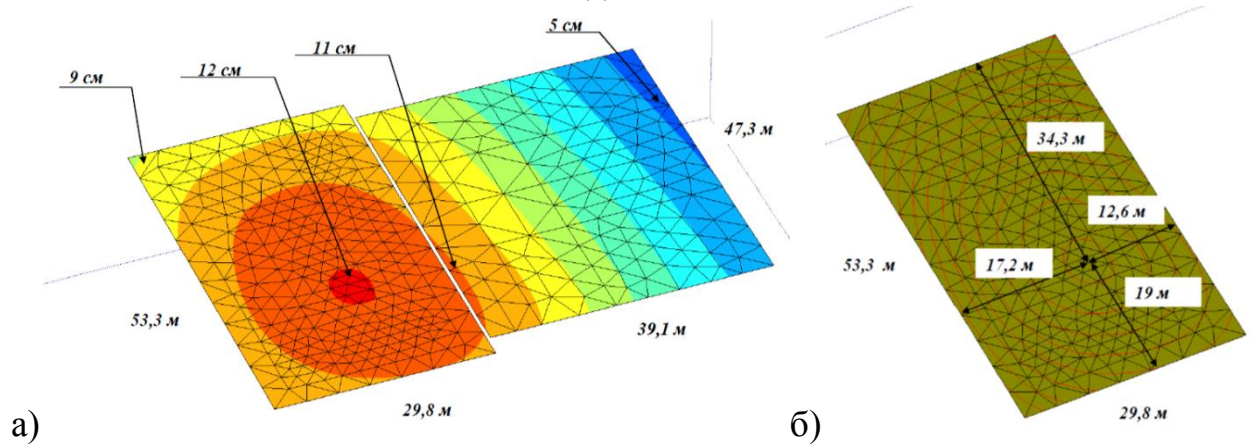


Рисунок 4.35 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень



Розрахункова модель 3.3. Виконання підсилення ґрунтової основи ґрунтоцementeними колонами та палями, що самозабурюються. Зрушуючі навантаження по Х

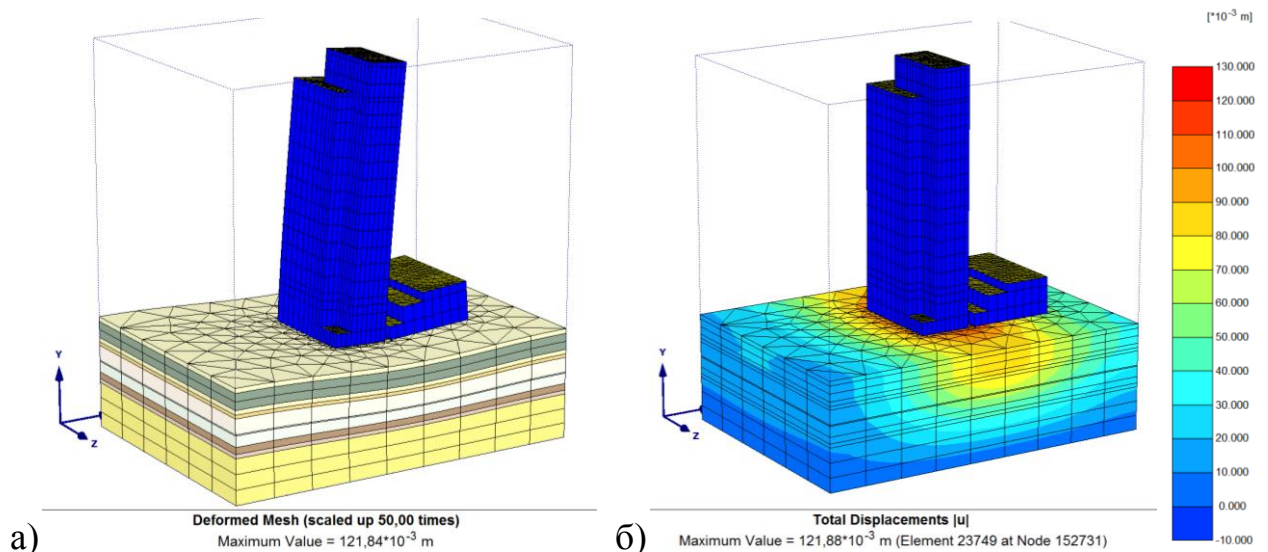


Рисунок 4.36 – а) Деформована сітка кінцевих елементів, б) Загальні деформації

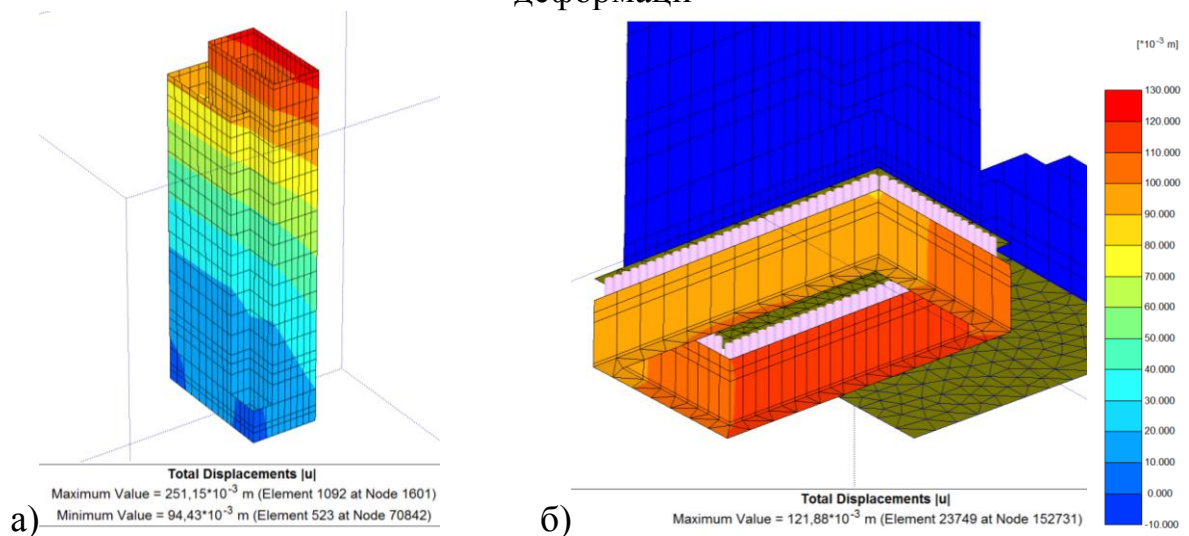


Рисунок 4.37 – а) Деформації будівлі, б) Загальні деформації елементів підсилення

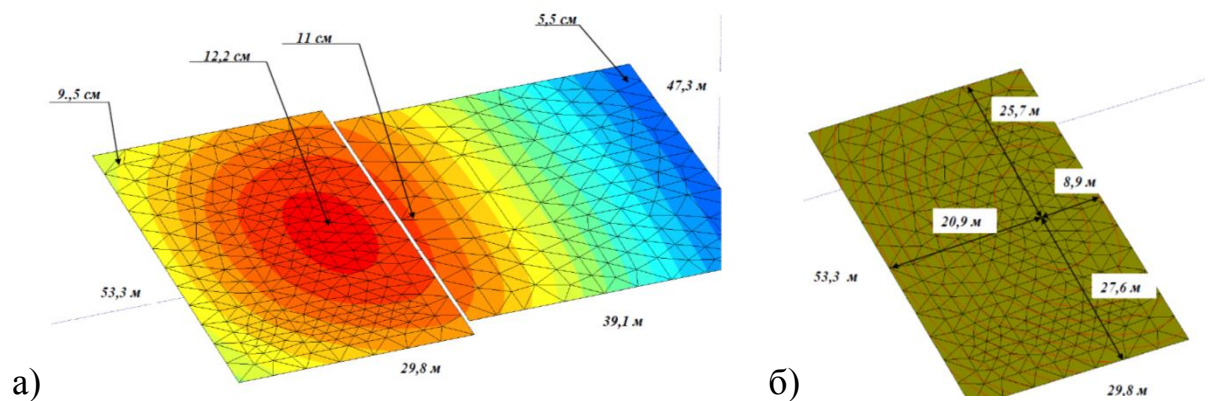
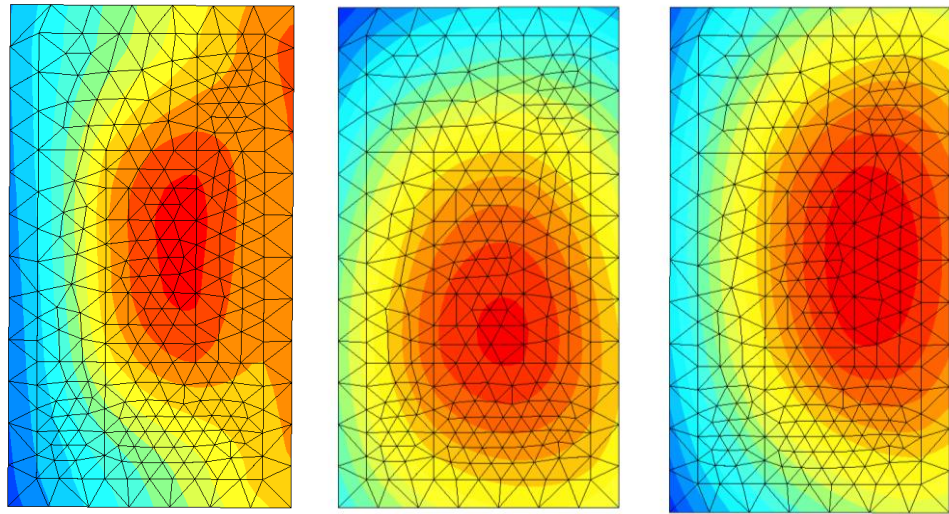


Рисунок 4.38 – Фундаментна плита: а) Максимальні переміщення фундаментної плити, б) Центр зони максимальних переміщень

Розрахункова модель 3.1...3.3. Підсилення ґрунтоцементними колонами та палями, що самозабурюються – Порівняння результатів



$\Delta_{\max}=96$  мм     $\Delta_{\max}=120$  мм (по осі Z)     $\Delta_{\max}=122$  мм(по осі X)

Рисунок 4.39 – Фундаментна плита. Загальні деформації

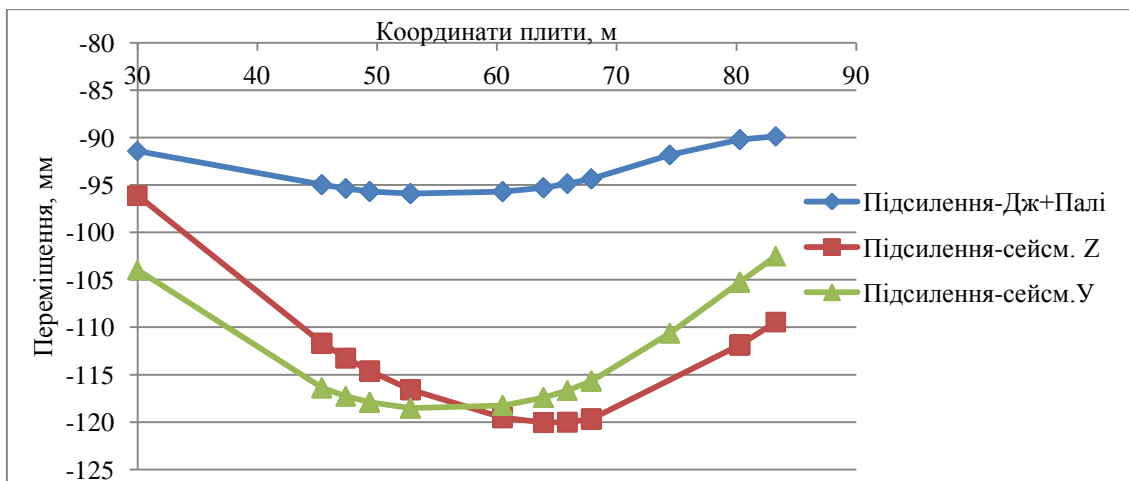


Рисунок 4.40 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

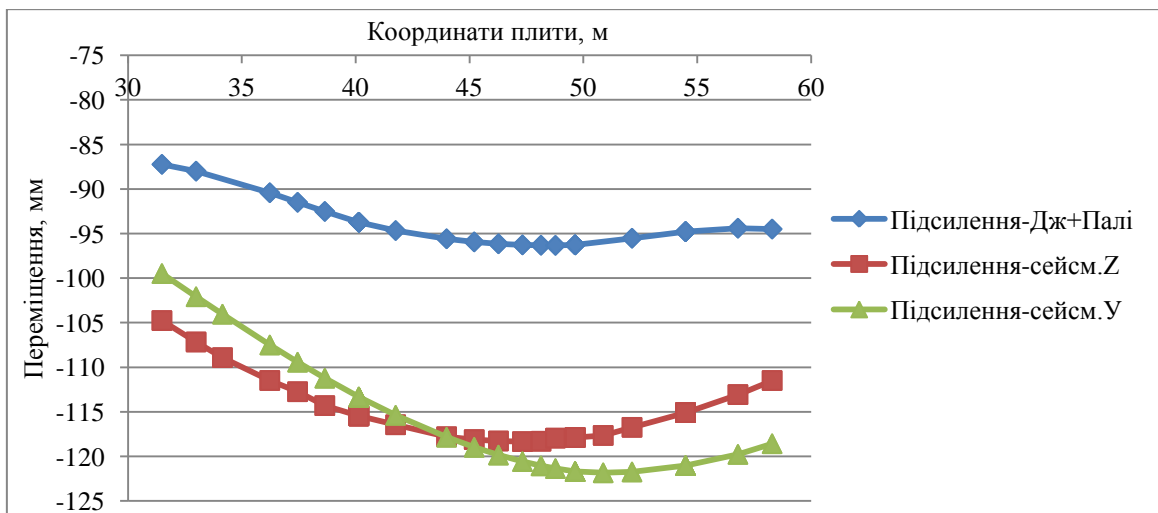


Рисунок 4.41 – Поперечний переріз по фундаментній плиті



При виконанні моделювання підсилення ґрунтової основи будівлі складно–компонентними системами (*Модель 3*), були отримані наступні результати:

- Максимальне кінцеве осідання фундаменту висотної частини будівлі становить 96,5 мм (рис. 4.29), при прикладанні навантаження, що відповідає сейсмічному впливу, осідання збільшуються до 120 та 122 мм.

- Осідання вирівнюються в межах 85...96 мм (рис. 4.38) по всій площі фундаментної плити. Найгірша відносна різниця становить:

$$(\delta_s / L)_u = (0,096\text{м} - 0,085\text{м}) / 30,5\text{м} = 0,0004 < 0,0020$$

- Наявність опори по периметру фундаментної плити під шаром вапняку у вигляді ряду ґрунтоцементних колон (рис. 4.37) призводить до практичного вирівнювання осідань фундаментної плити висотної будівлі (96,4 мм) і фундаментної плити паркінгу (90,0 мм) (рис. 4.38).

- Переміщення фундаментної плити при підсиленні складно–компонентними системами таке саме, як і при підсиленні тільки ґрунтоцементними колонами – 96 мм, але при прикладанні зрушуючого навантаження осідання склали 120 та 122 мм і є меншими за попередні результати (*Модель 2*), де осідання склали 125 та 130 мм.

*Порівняння результатів по всім моделям*

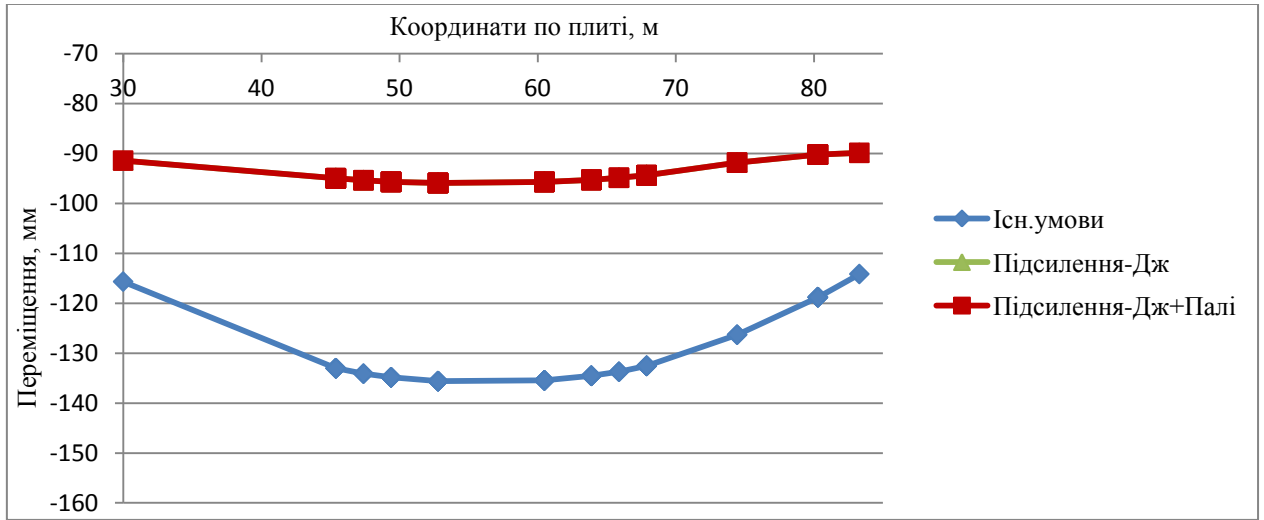


Рисунок 4.42 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

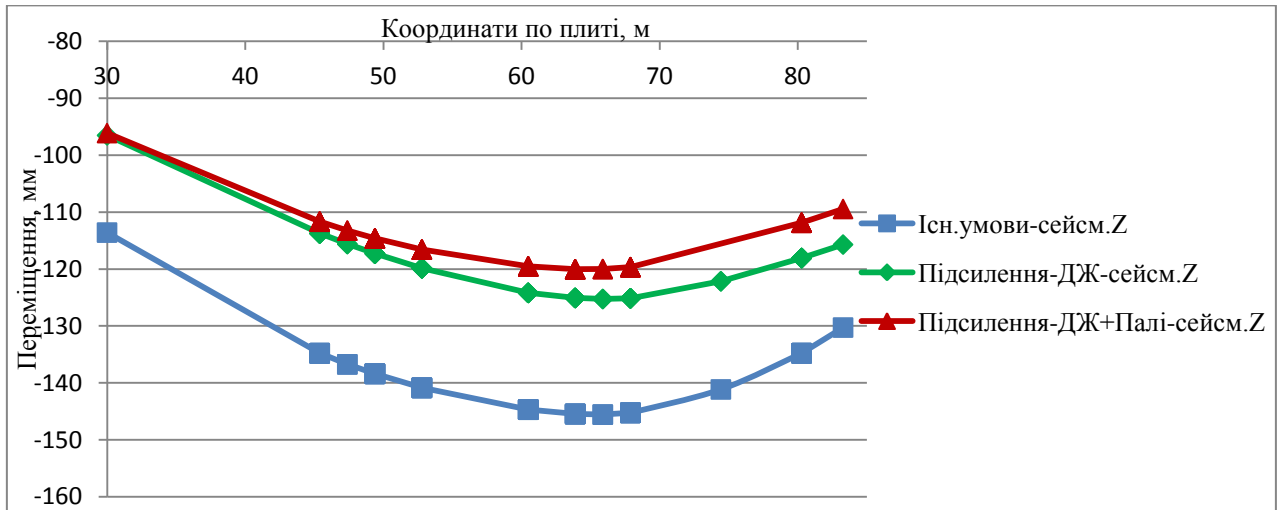


Рисунок 4.43 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

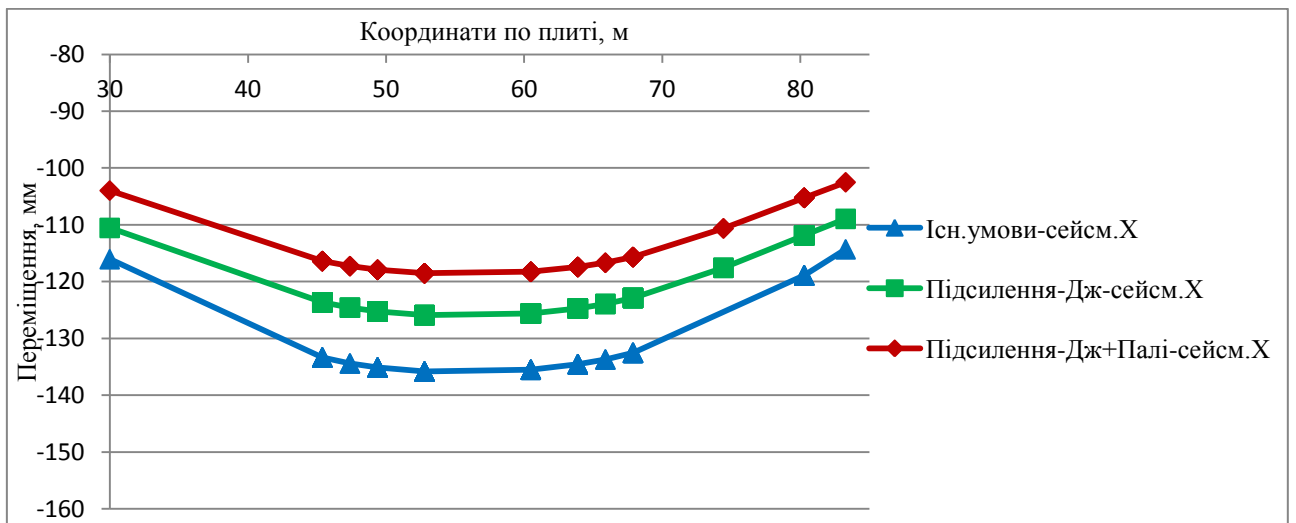


Рисунок 4.44 – Поздовжній переріз по фундаментній плиті

При виконанні аналізу кривих переміщень на рисунку 4.42 можна спостерігати, що криві переміщень при підсиленні ґрунтової основи фундаментів ґрунтоцементними колонами та підсилення складно–компонентними системами накладаються одна на одну, що в свою чергу показує, що при прикладанні навантаження від будівлі і ґрунтоцементні колони, як окремі елементи, та в комплексі з анкерними елементами, що самозабурюються, працюють однаково. Обидва методи підсилення дозволяють вирівняти епюри осідання фундаментної плити, що можна спостерігати при порівнянні з епюрою осідання при існуючих умовах.

При прикладанні зрушуючих зусиль по осі  $Z$  (рис. 4.43) та осі  $X$  (рис. 4.44) криві осідання фундаментної плити при підсиленні показують не тільки зменшення значення осідання, але й зменшення різниці максимального значення осідання фундаментної плити та значення осідання на крайній точці плити. Якщо при моделюванні прикладання тільки навантаження від будівлі при підсиленні двома методами різниці в поведінці підсиленої ґрунтової основи не було, то при прикладанні зрушуючих зусиль криві переміщення фундаментної плити при виконанні підсилення складно–компонентними системами (криві червоного кольору на рис. 4.43 та 4.44) мають менші числові значення, ніж при виконанні підсилення тільки ґрунтоцементними колонами (зелені криві на рис. 4.42 та 4.43). Це показує, що зв'язування фундаментної плити та шару вапняку з ґрунтоцементними колонами за допомогою анкерних елементів, що самозабурюються, працює ефективніше при дії зрушуючого зусилля на будівлю, ніж при виконанні підсилення тільки ґрунтоцементними колонами.

Порівняльний аналіз епюр переміщення фундаментної плити при всіх варіантах моделювання (рис. 4.42...4.44) дає змогу не тільки побачити позивний ефект при виконанні підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами, але і дозволяє дослідити поведінку будівлі при прикладанні на неї зрушуючих навантажень, що виникають при сейсмічному впливі (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Максимальні переміщення фундаментної плити

№	Модель	Значення переміщення при різних видах навантаження, м		
		Існуючі умови – навантаження від будівлі	Зрушуюче навантаження по вісі Z	Зрушуюче навантаження по вісі X
1	Існуючі умови	136	144	144
2	Підсилення основи будівлі ґрунтоцементними колонами	96	125	130
3	Підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами	96	120	122

При моделюванні підсилення ґрунтової основи існуючої висотної будівлі була використана сумісні робота таких геотехнологій як анкерні елементи типу Ischebeck Titan та ґрунтоцементні елементи круглого перерізу (колони), що виконані за допомогою технології струменевої цементації для створення складно–компонентної системи.

Ґрунтоцементні елементи у вигляді колон створили під шаром вапняку додатковий упор по периметру фундаменту, а анкерні елементи типу Ischebeck Titan, що зв'язали фундаментну плиту будівлі і нижній шар вапняку створили один двошаровий масив підвищеної жорсткості, який працює спільно (фундаментна плита з монолітного залізобетону товщиною 2,2 м і шар вапняку потужністю 3,5 м).

Підйом робочого інструменту при виконанні струменево–цементаційних елементів зі збереженням робочих параметрів (швидкість підйому, обертання та тиск цементного розчину) створить додаткове ін'єктування тріщинуватого шару вапняку. Виконання ґрунтоцементних елементів на глибині унеможливорює їх армування, але анкерні елементи типу Ischebeck Titan не тільки зв'язують фундаментну плиту з шаром вапняку, але й армують ґрунтоцементну колону на глибину 2 м.

За результатами моделювання максимальні осідання висотної будівлі зменшилися на 30% після виконання підсилення.

Дане моделювання вказує на те, що при прикладанні навантажень, що відповідають сейсмічному впливу, підсилення основи будівлі тільки колонами струменевого ін'єктування не є достатнім. Поєднання геотехнологій та виконання підсилення складно–компонентними системами дозволить не тільки зменшити осідання будівлі, але і запобігти виникненню наднормативного крену при впливі на неї зрушуючих зусиль.

#### **Висновки за розділом 4**

В попередніх розділах дослідної роботи та при експериментальних дослідженнях струменево–цементацийні елементи розглядалися як самостійні, а застосування їх при підсиленні ґрунтової основи розглядалося тільки для існуючих будівель.

В даному розділі розглянуто моделювання підсилення основи нового багатоповерхового будинку, де при проектуванні фундаментів не були враховані всі особливості складної інженерно–геологічної будови ґрунтової основи. В розглянутих умовах, а саме при наявності напівскельного ґрунту в основі будівлі, виконання підсилення тільки ґрунтоцементними колонами не вирішує всіх поставлених завдань. І тому в роботі показано спільну роботу елементів підсилення, виконаних за двома різними технологіями (анкерні елементи типу Ischebeck Titan і ґрунтоцементні колони, виконані за струменево–цементацийною технологією), де в роботу елементів підсилення включено шар вапняку, розташований в основі. Компонування двох технологій дало можливість створити складно–компонентний елемент підсилення. При виконанні розрахунків до моделі будівлі були прикладені не тільки навантаження від споруди, а і навантаження що моделюють зрушуючі зусилля при сейсмічному впливі, що дало змогу в повному обсязі оцінити позитивні аспекти комбінування двох технологій.

При розробці моделі кінцевих елементів розглянуто та обґрунтовано питання вибору і застосування розрахункових моделей для таких матеріалів як ґрунтоцемент, вапняк та інші ґрунти основи.

При оцінці результатів моделювання зроблено наступні висновки:

- основною перевагою обраних технологій є мінімальний динамічний вплив під час здійснення робіт та можливість виконання підсилюючих елементів в надскладних стиснених умовах;
- ґрунтоцементні елементи у вигляді колон створили під шаром вапняку додатковий упор по периметру фундаменту, а анкерні елементи типу Ischebeck Titan зв'язали фундаментну плиту будівлі і нижній шар вапняку;
- підйом робочого інструменту при виконанні струменево–цементацийних елементів зі збереженням робочих параметрів забезпечить додаткове ін'єктування тріщинуватого шару вапняку;
- виконання ґрунтоцементних елементів на глибині унеможлиблює їх армування, але анкерні елементи типу Ischebeck Titan армують ґрунтоцементну колону на глибину 2 м;
- за результатами моделювання максимальні осідання висотної будівлі зменшилися на 30% після виконання підсилення;
- покращений складений фундамент будівлі працює як плита підвищеної жорсткості, обперта на ряд колон по чотирьох сторонах, що зменшує загальне осідання будівлі і мінімізує можливість виникнення наднормативного крену при дії зрушуючих зусиль в складних інженерно–геологічних умовах.

Запропонована методика поєднання двох геотехнологій дозволить забезпечувати сумісну роботу елементів двох різних технологій при підсиленні існуючих будівель в сейсмічних районах з забезпеченням більшої ефективності підсилення.

Основні положення цього розділу викладені у наступних публікаціях здобувача: особливості застосування струменевої цементації в складних геологічних умовах в роботі [25], застосування розрахункового комплексу Plaxis для виконання геотехнічних розрахунків в роботах [15, 29, 30], питання

вибору ґрунтової моделі для виконання геотехнічних розрахунків та дослідження напружено–деформованного стану ґрунту в роботах [29, 31], дослідження методу підсилення основи складно–компонентними системами, їх моделювання та практичний досвід його застосування в роботі [27].

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

#### 5.1 Порівняльний аналіз витрат на будівельні роботи

Використовуючи розроблену в дисертаційній роботі методику з вдосконалення технологічних параметрів струменевої цементації можна суттєво зменшити кількість ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією. Дане зменшення, в свою чергу, призведе до значного економічного ефекту без втрати якості підсиленої ґрунтової основи.

Для аналізу економічних витрат при підсиленні ґрунтового масиву фундаментів існуючої будівлі при реконструкції кінотеатру "Жовтень" в м. Києві проведено порівняльний аналіз стандартних статей витрат відповідно до кошторису на будівельні роботи, виконаного за допомогою програмного комплексу АВК–5 (3.0.6) (Додаток Б) .

В кошторисну вартість будівельних робіт увійшли не тільки витрати на виконання ґрунтоцементних колон та матеріали, а також витрати на експлуатацію машин, заробітну плату та витрати на робітників, що не обслуговують машини. В перелік робіт, що виконувалися, увійшли також супутні роботи, такі як свердління отворів в бетоні та цегляній кладці, улаштування ніш в цегляних стінах для можливого виконання ґрунтоцементних колон заданого нахилу та бетонування цих ніш після робіт.

Відповідно до видів робіт кошторису при застосуванні розробленої методики врахування шару ґрунту з покращеними інженерно–механічними характеристиками навколо ґрунтоцементних колон, що дало можливість зменшити кількість колон на 15%, пораховано наступне зменшення основних статей витрат:

- Буріння свердловин діаметром 125 мм для улаштування ґрунтоцементних колон зменшилося на 298 п. м, відповідно ціна виконання цієї роботи зменшилася на 85 292 грн.



- Витрати портландцементу М400 для влаштування колон зменшилися на 145 т, відповідно зменшення вартості на 165 940 грн.;
- Вивезення зруйнованого ґрунту з відпрацьованим цементним розчином (пульпи) на відстань до 15 км зменшилось на 282 т, що зменшує вартість цієї роботи на 16 248 грн.

При зменшенні кількості ґрунтоцементних колон зменшуються об'єми супутніх робіт:

- Свердління отворів в цегляних стінах для забезпечення можливості виконувати ґрунтоцементні колони під заданим кутом нахилу: вартість робіт зменшилася на 4 458 грн.;
- Влаштування ніш в цегляних стінах: зменшення об'єму робіт на 2,9 м<sup>3</sup>, відповідно вартість на 1060 грн.;
- Армування влаштованих ніш після виконання ґрунтоцементних робіт арматурою А240С діаметром 6 та 12 мм: вага арматурного прокату зменшилася на 170 кг, відповідно вартість – на 1 888 грн.;
- Виконання бетонування зменшується відповідно до зменшення об'єму ніш: зменшення вартості на 2 889 грн.

При загальній кошторисній вартості будівельних робіт 3 231 619 грн. загальне зменшення витрат на матеріали і роботи складає 484 743 грн.

Слід зазначити, що важливим позитивним аспектом буде зменшення строків виконання ґрунтоцементних колон для підсилення ґрунтової основи фундаментів. Час виконання робіт з влаштування ґрунтоцементних колон в ґрунтовій основі кінотеатру "Жовтень" складав 2 календарних місяці. При зменшенні кількості ґрунтоцементних колон строки виконання зменшаться на 10 днів.

## Висновки за розділом 6

Вивчення та дослідження впливу виконання струменево–цементацийних елементів на оточуюче ґрунтове середовище, виконане в дисертаційній роботі, дозволило розробити методику підсилення ґрунтової основи існуючих будівель з урахуванням покращених фізико–механічних характеристик оточуючого ґрунтового середовища, що, в свою, чергу зменшило кількість ґрунтоцементних колон на 15%.

На прикладі виконаного проєкту з підсилення ґрунтової основи будівлі в м. Києві проведено порівняльний аналіз стандартних статей витрат відповідно до кошторису на будівельні роботи, виконаного за допомогою програмного комплексу АВК–5.

В порівняльному аналізі бралися до уваги не тільки основні роботи, такі як буріння, влаштування ґрунтоцементних колон та витрати цементу, але всі види супутніх робіт: влаштування ніш в цегляній стіні, армування та їх бетонування, свердління отворів в цегляній стіні для проходження бурового обладнання.

При загальній кошторисній вартості на будівельні роботи 3 231 619 грн. загальне зменшення витрат на матеріали і роботи складає 484 743 грн.

Термін виконання робіт зменшується відповідно до зменшення кількості необхідних ґрунтоцементних колон: при повному терміні робіт 2 місяці економія часу склала 10 днів. Даний факт, в свою чергу, дозволить зменшити витрати труда робітників, роботу бурових машин та іншого будівельного обладнання, витрати на паливо та час роботи людей, що працюють на обслуговуванні машин.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково–дослідною роботою, в якій виконано дослідження з вдосконалення технологічних параметрів струменевої технології з урахуванням геотехнічних характеристик масиву. У процесі роботи над дисертаційним дослідженням досягнуто його мету, виконано всі поставлені завдання та отримано такі основні науково–практичні результати:

1. На основі дослідних даних було виконано аналіз взаємозв'язку режимів та технологічних параметрів струменевої цементації від діаметра ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів, отримано залежності швидкості підйому від діаметра ґрунтоцементної колони. Отримані результати дозволяють полегшити підхід до вибору робочих параметрів бурового інструменту.

2. Встановлено експоненціальну залежність між енергією струменя та отриманим діаметром колони, на основі якої розроблено методику його визначення для різних типів ґрунтів, тиску струменя, швидкості підйому гідромонітору та витрат цементного розчину.

3. На основі порівняльного аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено поправочні коефіцієнти для співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів колони, які складають для піску і супіску  $K=0,8$ , для суглинку  $K=0,9$ , що дозволяє визначити реальний діаметр ґрунтоцементної колони в різних інженерно–геологічних умовах

4. Експериментальним шляхом доведено покращення фізико–механічних властивостей масиву, оточуючого струменево–цементацийний елемент, доведено експериментальним та шляхом моделювання, що в різних ґрунтових умовах зона ґрунту з поліпшеними фізико–механічними характеристиками варіюється від 10 до 30 см.

5. На розрахунковій моделі підсилення ґрунтової основи доведено покращуючий ефект врахування зони поліпшеного ґрунту, що дало змогу

зменшити в проєкті кількість ґрунтоцементних колон та витрату матеріалів на 15%.

6. Для складних інженерно–геологічних умов розроблено метод підсилення ґрунтових основ складно–компонентними системами, що складаються з елементів двох геотехнологій – анкерних елементів типу Ischebeck Titan та ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією.

7. Застосування розробленої методики врахування зони покращеного ґрунту при виконанні підсилення основи будівлі ґрунтоцементними колонами дозволило забезпечити економічний ефект в розмірі 484 743 грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. Москва: "Недра", 1989. 270 с.
2. Бройд И.И., Мельник Г.В. Ликвидация суфозионных полостей и областей разуплотненных грунтов с использованием струйной геотехнологии *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1997. №3. С.12–15.
3. Бройд И.И. Струйная геотехнология: Учебное пособие. Москва: Издательство ассоциации Строительных вузов, 2004. 448 с.
4. Бройд И.И. Нетрадиционные гидравлические прикладные задачи и технологии. Москва: Издательство ассоциации Строительных вузов, 2008. 256 с.
5. Вакутин А.П., Малинин А.Г., Смирнов А.Н., Малинин Д.А. Прогрессивные конструкции и технологии производства форсунок для струйных мониторов. *Метро и тоннели*. 2011. №3. URL: [http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/102\\_Forsunka.pdf](http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/102_Forsunka.pdf).
6. Винников Ю.Л., О.І. Ярмолук. Будівельні властивості ґрунтоцементу за наявності у його складі органічних речовин. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно–гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Дніпро: ПГАСА. 2010. Вип. 56. С. 97–103.
7. Винников Ю.Л. Веденисов А.В. Модельные исследования эффективности ґрунтоцементных разделительных экранов для защиты зданий от влияния. *Вестник ПНИПУ*. 2015. №1. С. 51–63.
8. Винников Ю.Л., Ярмолук А.И. Лабораторные исследования цементации заторфованных грунтов буросмесительным методом. *Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сборник трудов научно–технической конференции*. СПбГАСУ. 2010. С. 236–240.
9. Власов С.Ф. Теоретические и прикладные основы струйного закрепления слабых дисперсных пород при ведении горных работ: диссертация на

соискание ученой степени доктора технических наук. 05.15.09. Днепропетровск, 1999. 359 с.

10. Власов С.Ф., Максимова–Гуляева Н.А. Повышение устойчивости оползнеопасных склонов с помощью струйной технологии закрепления грунтов. Днепропетровск: НГУ. 2010. 140 с.
11. Власов С.Ф., Тимченко С.Е., Рябичев В.Д. Интенсификация процессов струйного закрепления пород при магнитной обработке цементных растворов. Луганск: Янтарь. 2005. 125 с.
12. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъецирования в качестве противofильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций глубоких выемок в условиях плотной застройки. *Світ геотехніки*. 2011. №4. С. 19–21.
13. Губашова В.Є. Досвід виконання ґрунтоцементних елементів по технології струменевої цементації в шлаках доменного виробництва (Experience of carrying out of ground–cement elements on the jet grouting technology in slags of a blast–furnace process). *Науково–технічний журнал "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві"*. Вінниця, 2019. Том 27 №2 С. 87–95.
14. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъецирования в качестве противofильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций. *Міжвідомчий науково–технічний збірник "Будівельні конструкції"*. Київ, 2011. №75. Книга 2. С.635–642.
15. Губашова В.Е. Сравнение геотехнических расчетных комплексов на примере расчета ограждения котлована в г. Киеве. *Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Международной научно–технической конференции, посвященной 60–летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90–летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского* (Минск, 23–25 октября 2013 г.). В 2 ч. Ч. 1. Минск : БНТУ, 2013. С. 212–219.

16. ДБН В.2.1–10.2009. Основи та фундаменти. Зміна №1 [Чинний від 01.07.2009]. Вид. офіц.. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 82 с.
17. Киричек Ю.А., Комиссаров Г.В. Методы устройства искусственных оснований из грунтоцемента под фундаменты мелкого. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. №7. С. 15–19.
18. Киричек Ю.А., Комиссаров Г.В. Конструкції з грунтоцементу для зведення фундаментів будівель і споруд. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. №3. С. 42–50.
19. Киричек Ю.А., Комиссаров Г.В. Анализ области применения грунтоцемента в геотехнике. *Будівельні конструкції*. Київ: ДП НДІБК. 2016. Вип. 83, кн. 1. С. 529–538.
20. Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Зоценко В.М. Бурові грунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: Друкарня Мадрид, 2016. 94 с.
21. Зоценко Н.Л. Грунтоцементные сваи, изготавливаемые буросмесительным методом. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава: Пол.НТУ, 2013. Вип. 3(38). С. 110–122.
22. Зоценко Н.Л., Вагидов М.М. Грунтоцементные основания и фундаменты. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/gruntotsementnye-osnovaniya-i-fundamenty>.
23. Зоценко М. Л. Грунтоцемент – конструктивний і гідроізоляційний матеріал при будівництві підземних споруд. *Будівельні конструкції*. 2016. Вип. 83. С. 296–316. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko\\_2016\\_83\(2\)\\_\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2016_83(2)__37).
24. Зоценко М.Л., Борт О.В. Ефективність роз'єднувальних стінок у ґрунті при захисті існуючих будівель від впливу новобудов. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. №1. С. 24–27.
25. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Использование метода струйной цементации (струйного инъектирования) грунтов при

- усилении фундаментов в сложных геологических условиях. *Вісник Криворізького Технічного Університету*. Кривий Ріг, 2011. Випуск 27. С.262–265.
26. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Є. Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико–механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Науковий журнал "Енергетика: економія, технології, екологія"*. Київ, 2019. №4. С. 27–34.
  27. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є. Моделювання підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ, 2020. №1 (46). С. 36–44.
  28. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Е. Особливості формування елементів струменевої цементації в заторфованому суглинку. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія "Технічні науки"*. Київ, 2020. Том 31 (70), №2. С. 198–202.
  29. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є., Шайдецька Л.В. Особливості врахування впливу будівельної техніки на стійкість конструкції котловану при щільній міській забудові. *Збірник наукових праць НГУ.–Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»*. 2018. №54. С.170–183.
  30. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Стабілізація ґрунтового масиву за допомогою ін'єкційних анкерів. Порівняльний аналіз особливостей проектування. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету "Дніпровська Політехніка"* Дніпро, 2020. №60–06. с. 58–68.
  31. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Изменение напряженно–деформируемого состояния грунтов при устройстве глубоких выемок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доповідей 71 Міжнародної науково–технічної конференції*. Дніпропетровськ, 14–15 апреля 2011. С.231–232.



32. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Обзор технологии струйной цементации и ее применение в городском строительстве. *Elmi-nezeri jurnal "Yer Ve Insan"*. Azerbaijan, 2020. №01 (13). Pp. 67–72.
33. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: монография. Пермь: Пресстайм, 2007. 168 с.
34. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов в городском строительстве URL: [http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/14\\_2003PC07-08.pdf](http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/14_2003PC07-08.pdf)
35. Малинин А.Г. Ограждение котлованов с помощью технологии струйной цементации грунта. URL: [http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/21\\_Malinin\\_A.G.\\_Ograzhdenie\\_kotlovanov.pdf](http://www.jet-grouting.ru/userfiles/File/files/21_Malinin_A.G._Ograzhdenie_kotlovanov.pdf).
36. Малинин А.Г., Гладков И.Л. Экспериментальные исследования диаметра грунтоцементных колон в различных грунтах. URL: <http://www.jet-grouting.ru/userfiles>.
37. Малинин А.Г., Гладков И.Л., Жемчугов А.А. Исследование прочностных и деформационных характеристик грунтоцемента в зависимости от технологических параметров струйной цементации. *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. №6. С. 53–55
38. Матеріали компанії Compagnia Consolidamenti e Pali, Italia. Prospekt "Technologie brevetée pour consolidation et colonnes au moyen d'injections à très haute pression".
39. Матеріали компанії Soletanche Bachy, Nanterre, France.
40. Матеріали компанії Soletanche Czech Republic, Prague, Czech Republic.
41. Матеріали компанії SolData Group, Киев, Украина.
42. Матеріали компанії ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş, Istanbul, Turkey.
43. Свод правил СП 291.1325800.2017 Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования. [Действующий с 2017–11–01]. Издание официальное Москва: Стандартинформ, 2017. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744721.htm>
44. Форум проектувальників Білорусії. URL: <https://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=630162&page=30>

45. Фоменко И.К., Кургузов К.В. , Зеркаль О.В. , Сироткина О.Н. О модели поведения грунтов Мора–Кулона. *Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов – изыскания и проектирование*: материалы докладов Общероссийской научно–практической конференции. Москва, 20–21 сентября 2008 г. С. 130–137.
46. Хасин М.Ф., Малышев Л.И., Бройд И.И. Струйная технология закрепления грунтов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1984. №5. С. 10–12.
47. Хасин М.Ф. Струйная геотехнология в строительстве. *Геотехническое строительство*. 2000. №8. С. 35–42.
48. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. –4–е изд., доп. и перераб. Ленинград: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. с. 401–403.
49. Alzamora, D., M. H. Wayne, and J. Han. Performance of SRW supported by geogrids and jet–grout columns. *Proceedings of ASCE Specialty Conference on Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities: Geotechnical Special Publication* 94. 2000. pp. 456–466.
50. AGI (Associazione Geotecnica Italiana). Jet Grouting Guidelines. Edizioni AGI, 2012. 69 p. URL: <http://www.associazionegeotecnica.it/pubblicazioni/jet-grouting-raccomandazioni>
51. ASCE–2009 (American Society of Civil Engineers) *Grouting Committee Jet Grouting Task Force*. Jet Grouting Guideline, 2009. 29 p.
52. Balossi Restelli, A. et al., Tecnologie speciali per il preconsolidamento di scavi nelle alluvioni di Milano in occasione della costruzione della linea 3 della Metropolitana, *In Proceedings of the International Conference ‘Grandi Opere Sotterranee’*, Florence, Italy. June 8–11, 1986. pp. 612–618.
53. Bell A.L. Jet grouting. *Ground Improvement* (ed. M.P. Moseley). Blackie, 1993. 218 pp.
54. Bergschneider B., Walz B. Jet Grouting – range of the grouting jet. *XIII–th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnical problems with man–made and man influenced grounds"*. Vol.2. Prague. 7–9 August, 2003. Pp. 53–56.

55. Bouassida A. Sur une nouvelle méthode de dimensionnement des fondations sur sol renforcé par colonnes. *Comptes rendus du Quinzième Congrès International de Mécanique des Sols et de la Géotechnique*. Istanbul, 2001. Pp. 2783–2790.
56. Brill G.T., Burke G.K., Ringen A.R. A ten-year perspective of Jet Grouting: advancements in applications and technology. *Grouting and ground treatment. Proceedings of the Third International Conference*. Vol. 1. No. 120. February, 2003. Pp. 218–235.
57. Burke G.K. The state of the art of jet grouting in the United States. *Proceedings of the International Geotechnical Conference*. Moscow, GRF. 30–31 August, 2010. Pp. 51–58.
58. Bustamant M., Gouvenot D. Dimensionnement des colonnes de jet grouting comme élément porteur et d'ancrage. *Comptes rendus du Quinzième Congrès International de Mécanique des Sols et de la Géotechnique*. Istanbul, 27–31 Aout, 2001. Pp. 2777–2782.
59. Celma J.J., Carrion M.A. Design and control parameters for Jet Grouting. *XIII-th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds"*. Vol.2. Prague, 25–28 August, 2003. Pp. 87–92.
60. Covil C.S., Skinner A.E. Jet grouting: a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the ground*. London: Thomas Telford, 1994. 649 pp.
61. Croce P., Flora A. Analysis of single-fluid jet grouting. *Géotechnique*. 2000. Vol. 50. No. 6. Pp. 739–748.
62. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, Design and Control New York: CRC Press Taylor&Francis Group. 2014. 298 pp.
63. Croce P., Modoni G. Numerical modelling of jet-grouted foundations. *5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Paris, 4–6 September, 2002. Pp. 453–458.
64. Croce P., Flora A., Modoni G. Experimental investigation of Jet-grouting. *Foundation and Ground Improvement. Proceedings of the Conference American*

- Society of Civil Engineers "2001 a GeoOdyssey"*, Blacksburg, VA. 9–13June, 2001. Pp. 245–259.
65. Croce P, Modoni G. Design of jet-grouting cut-offs. URL: <https://www.researchgate.net/publication/250073174>
  66. Croce P., Modoni G The characteristic strength of jet-grouted material *Geotechnique*. 2018, Vol.3. Pp.234–253.
  67. Croce, P. and A. Flora The characteristic strength of jet-grouted material. *Rivista Italiana di Geotecnica* . 1998. Vol.2. pp. 5–14.
  68. Dabbagh A.A., Gonzalez A.S., Peña A.S. Soil erosion by a continuous water jet. *Soil Found*. 2002. Vol. 42. No. 5. Pp. 1–13.
  69. Deutsche Norm *DIN 4093–2015* "Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl". November 2015. 36 p.
  70. Durgunoglu H.T., Kulac H.F., Yilmaz S., Kocak D. Case history for soil improvement of SETAT 2002 High Rise Residential by Jet Grouting in Istanbul. *Grouting and ground treatment. Proceedings of the Third International Conference*. New Orlean, Louisiana, 10–12 February, 2003. Vol. 1. No. 120. Pp. 377–388.
  71. Durgunoglu, H. T., Kulac, H. F., Oruc K., Yildiz, R. Sickling J., Boys, I. E., A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction, for a cigarette factory in Turkey. URL: [https://www.researchgate.net/publication/268590870\\_A\\_Case\\_History\\_of\\_Ground\\_Treatment\\_with\\_Jet\\_Grouting\\_against\\_Liquefaction\\_for\\_a\\_Cigarette\\_Factory\\_in\\_Turkey](https://www.researchgate.net/publication/268590870_A_Case_History_of_Ground_Treatment_with_Jet_Grouting_against_Liquefaction_for_a_Cigarette_Factory_in_Turkey).
  72. EN 12716:2001 Execution of special geotechnical works – Jet grouting. The Sector Committee for Building and Civil Engineering. 15 August 2001. 38 p.
  73. Flora, A. et al., The diameter of single–, double– and triple–fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results. *Géotechnique*. 2013. Vol.63(11). Pp. 934–945.
  74. Franz R.J., Camper K.E. Jet grout culumns in mixed profile to controle foundation settlement Gerald Ratner Athletics Center. *Grouting and ground*

- treatment. Proceedings of the Third International Conference*. 2003. Vol. 1. No. 120. Pp. 389–400.
75. Gubashova V. Experience of performance of the horizontal anti-filtration screen with the application of double fluid jet grouting. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. Poland, 2020. №1(53) Pp. 28–34.
  76. History technology examples of applications. The Jet Grouting. Pacchiosi, Italy. URL: <http://www.pacchiosi.com/jetgrouting.asp>
  77. Ibragimov M. N. Characteristics of soil grouting by hydro-jet technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013. Vol. 50. No. 5. Pp. 200–205.
  78. Ibragimov M. N, Semkin V. V. Soil Stabilization by Cement–Grout Injection. Izdatel'stvo ASV. 2012. 238 p.
  79. Imanishi H., Yamauchi Y. Ground behavior during soil improvement by Jet Grouting. *Grouting and Deep Mixing*. Balkema, Rotterdam. 1996. Pp. 133–136.
  80. Jet Grouting technology equipments experiences. Pacchiosi, Italy. URL: <http://www.pacchiosi.com/jetgrouting.asp>
  81. Katzenbach R., A. Weidle H. Hoffmann. Jet grouting: Chance of risk assessment based on probabilistic methods. *Proceedings of the 15th ICSMFE*, Istanbul, Turkey, 27–31 August, 2001. Pp. 1763–1766.
  82. Kanematsu H. High pressur jet grouting method. *Civil Construction*. 1980. Vol. 21. No. 13. pp. 136–147.
  83. Kauschinger J.L., Perry E.B., Hankour R. Jet grouting: state-of-the-practice. *Grouting/soil improvement and geosynthetics, ASCE Geotech. Spec. Publ.* 1992. Vol. 1. No. 30. Pp. 169–181.
  84. Kauschinger J.L., Hankour R., Perry E.B. Methods to estimate composition of Jet Grout bodies. *Grouting soil improvement and geosynthetics*. Vol. 1. No. 30. Pp. 194–205.
  85. Lunardi P. Il consolidamento del terreno mediante jet grouting. *Quarry and Construction*, 1992. pp. 127–140.

86. Lunardi P. Ground improvement by means of jet-grouting. *Ground improvement*. 1997. Vol. 1. Pp. 65–68. URL: [www.rocksoil.com](http://www.rocksoil.com).
87. Meyers J., Meyers T., Petrasic K. Jet grout of steeply excavated soil slope. *Grouting and ground treatment. Proceedings of the Third International Conference*. February, 2003. Vol. 1. No. 120. Pp. 318–329.
88. Miki G. Soil improvement by jet grouting. *Proc. 3rd Int. Geotechnical Seminar on Soil Improvement Method*. Singapore. 27–29 November, 1985. Pp. 45–52.
89. Miki G., Nakanishi W. Technical progress of jet grouting method and its newest type. *Proceeding of the international conference on in situ soil and rock reinforcement*. Paris. 27–31 August, 1984. Pp. 195–200.
90. Modoni G., Croce P., Mongiovi L. Theoretical modelling of jet grouting. *Géotechnique*. 2006. Vol. 56. No. 5. Pp. 335–347.
91. Modoni G., Bzowka J. Analysis of foundations reinforced with jet grouting, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012. No. 138(12), pp. 1442–1454.
92. Modoni G., Njock P., Arulrajah A., Yong-Hyun Kim A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. №11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>.
93. Morey J., Mathieu F. Le procédé "JetPlus" optimise le jet grouting. *Symposium International Sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris, 9–10 September, 2004. Pp. 245–261.
94. Morey J., Campo D.W. Quality control of jet grouting on the Cairo metro. *Ground Improvement*. 1999. Vol. 3. No. 2. Pp. 67–75.
95. Pacchiosi drill. History technology examples of applications. The Jet Grouting URL: [www.pacchiosi.com](http://www.pacchiosi.com)
96. Plaxis 3D Foundation. Material models manual. Plaxis bv, AN Delft, The Netherland. URL: [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl).

97. Rawling C.G., Hellowell E.E., Kilkenny W.M. Grouting for ground engineering. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), 1998. 176 p.
98. Shibazaki M. State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication No. 120: Grouting and Ground Treatment*. 2003. Vol. 1. Pp.198–217.
99. Shibazaki M., Yokoo M., Yoshida H. Development oversized Jet Grouting. *Grouting and ground treatment. Proceedings of the Third International Conference*. 10–12 February, 2003. Vol. 1. No. 120. Pp. 294–302.
100. Sönmez Ejder. An investigation on the contribution of jet grout strutting to the stability of deep retaining systems by finite element method. Dokuz eylül university graduate school of natural and applied sciences. Izmir, 2010. 120 p.
101. Summers D.A. Waterjetting Technology. Summers D.A. – E & FN Spon, London. 1995. 882 p.
102. Stein J., Graße J. Jet grouting tests and simulation. *Proceedings of the 13th ECMSGGE*, Prague, Czech Republic, 25–28 August, 2003. Pp. 899–902.
103. Tornaghi R., Pettinaroli A. Design control criteria of jet grouting treatment. *Symposium International Sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris. 14 October, 2004. Pp. 295–319.
104. Vleeschauwer, H. and Maertens, G., Jet grouting: State of the art in Belgium, *Proceedings of the Conference 'Grouting–Soil improvement–Geosystem including reinforcement'*, Finnish Geotechnical Society. Helsinki. 7–9 June, 2000. Pp. 145–156.
105. Wong L.W., Ju D.H., Wu P.J. Control of Ground Movements caused by jet grouting. *Intarnational Conference on Ground Improvament Techniques*. Macau. 6–8 May, 1997. Pp. 649–656.
106. Yahiro T., Yoshida H. Intoduction grouting method utilizing high–speed water jet. *Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Moscow. 6–11 August, 1973. Pp. 402–403.

## ДОДАТОК А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані *основні результати дисертації*.

#### *Публікації у наукових фахових виданнях:*

1. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Использование метода струйной цементации (струйного инъектирования) грунтов при усилении фундаментов в сложных геологических условиях. *Вісник Криворізького Технічного Університету*. Кривий Ріг, 2011. Випуск 27. С.262–265.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження застосування струменевої цементації для підсилення ґрунтових основ фундаментів існуючих будівель.

2. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъектирования в качестве противофильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций глубоких выемок в условиях плотной застройки. *Світ геотехніки*. 2011. №4. С. 19–21.

3. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Є. Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико–механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Науковий журнал "Енергетика: економія, технології, екологія"*. Київ, 2019. №4. С. 27–34.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження впливу високонапірного струменя на зміну фізико–механічних характеристик ґрунтів при виконанні ґрунтоцементних колон за струменевою геотехнологією.

4. Gubashova V. Experience of carrying out of ground–cement elements on the jet grouting technology in slags of a blast–furnace process (Досвід виконання ґрунтоцементних елементів по технології струменевої цементації в шлаках доменного виробництва). *Науково–технічний журнал "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві"*. Вінниця, 2019. Том 27 №2, с. 87–95.



5. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є. Моделювання підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ, 2020. №1 (46). С. 36–44.

*Особистий внесок здобувача:* моделювання підсилення ґрунтової основи складно–компонентними системами (комбінування ґрунтоцементних колон та анкерних паль) за допомогою геотехнічного розрахункового комплексу.

6. Зуевская Н.В., Шайдецька Л.В, Губашова В.Е. Особливості формування елементів струменевої цементації в заторфованому суглинку. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія "Технічні науки"*. Київ, 2020. Том 31 (70), №2. С. 198–202.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження особливостей формування ґрунтоцементних колон в заторфованих суглинках.

***У закордонних збірниках наукових праць інших держав, які входять до  
ОЕСР та Європейського Союзу:***

7. Gubashova V. Experience of performance of the horizontal anti–filtration screen with the application of double fluid jet grouting. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. Poland, 2020. №1(53) Pp. 28–34.

Наукові праці, які ***додатково відображають наукові результати дисертації.***

***Публікації у наукових фахових виданнях:***

8. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є., Шайдецька Л.В. Особливості врахування впливу будівельної техніки на стійкість конструкції котловану при щільній міській забудові. *Збірник наукових праць НГУ.–Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»*. 2018. №54. С.170–183.

*Особистий внесок здобувача:* застосування геотехнічних розрахункових комплексів для виконання моделювання та дослідження напружено-деформованого стану та впливу на елементи огородження.

9. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Стабілізація ґрунтового масиву за допомогою ін'єкційних анкерів. Порівняльний аналіз особливостей проектування. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету "Дніпровська Політехніка"* Дніпро, 2020. №60–06. с. 58–68.

*Особистий внесок здобувача:* аналіз проектних підходів та моделювання ін'єкційної частини ґрунтового анкера з подальшим дослідженням напружено-деформованого стану ґрунтового масиву за допомогою геотехнічного розрахункового комплексу.

***У закордонних періодичних виданнях:***

10. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Обзор технологии струйной цементации и ее применение в городском строительстве. *Elmi-nəzəri jurnal "Yer Və İnsan"*. Azerbaijan, 2020. №01 (13). Рр. 67–72.

*Особистий внесок здобувача:* дослідження застосування струменевої геотехнології для рішення різноманітних задач в міському будівництві.

***У інших науково-технічних виданнях:***

11. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъекирования в качестве противофильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций. *Міжвідомчий науково–технічний збірник "Будівельні конструкції"*. Київ, 2011. №75. Книга 2. С.635–642.

***Публікації за матеріалами конференцій:***

12. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Изменение напряженно–деформируемого состояния грунтов при устройстве глубоких выемок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доповідей 71 Міжнародної науково–технічної конференції*. Дніпропетровськ, 2011. С.231–232;
13. Губашова В.Е. Сравнение геотехнических расчетных комплексов на примере расчета ограждения котлована в г. Киеве. *Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Международной научно–технической конференции, посвященной 60–летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90–летию со дня рождения профессора Юрия*

*Александровича Соболевского* (Минск, 23–25 октября 2013 г.). В 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2013. С. 212–219.

### **ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ**

1. 3–rd Soletanche Bachy Group Designers meeting, London, UK, 3–4 December, 2008 – доповідь.
2. 71 Международная научно–практическая конференция "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта", Восточный научный центр транспортной академии Украины, г. Днепропетровск, 14–15 апреля 2011 года – доповідь та публікація.
3. Третя науково–практична конференція з іноземною участю «Застосування передових технологій в цивільному та промисловому будівництві», СП ТОВ «Основа–Солсиф», ДП "НДІБК", Національний транспортний університет та Київський національний університет будівництва і архітектури. м. Київ, 24 травня 2012 року – доповідь.
4. Восьма всеукраїнська науково–технічна конференція "Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування", Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, 18–20 листопада 2013 р. – доповідь.
5. Международная научно–техническая конференция, посвященная 60–летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90–летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского "Геотехника Беларуси: наука и практика", г. Минск, 23–25 октября 2013 г. – доповідь та публікація.
6. Міжнародна науково–технічна конференція "Інноваційні технології в будівництві", Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 13–15 листопада 2014 р. – доповідь.
7. 5–th Soletanche Bachy Group Designers meeting, Budapest, Hungaria, 8–9 December 2011 – доповідь.

8. 2<sup>nd</sup> ECE Safety Seminar, Soletanche Bachy, Bucharest, Rumania, 5–7 may 2017 – доповідь.
9. Третя Всеукраїнська науково–технічна конференція «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання», ДП НДІБК. м. Київ, 24–25 травня 2017 – доповідь.

## ДОДАТОК Б

Реконструкція будівлі цілісного майнового комплексу "Кінотеатр "Жовтень" на вул. Костянтинівській, 26 в Подільському районі м. Києва

### Локальний кошторис на будівельні роботи

на Підсилення основи фундаментів ґрунтоцементними колонами з використанням технології Jet Grouting

Реконструкція будівлі цілісного майнового комплексу "Кінотеатр "Жовтень" на вул. Костянтинівській, 26 в Подільському районі м. Києва

Основа:  
креслення (специфікації ) №

Кошторисна вартість	3231,619 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість	8,89546 тис.люд.–год.
Кошторисна заробітна плата	214,33 тис. грн.
Середній розряд робіт	4,1 розряд

Складений в поточних цінах станом на “23 червня” 2015 р.

№ п/п	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.–год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
					заробітної плати	в тому числі за робітної плати			в тому числі за робітної плати	тих, що обслуговують машини	
										на одиницю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<b>Розділ 1. Улаштування джет-паль діаметром 600мм з уширенням до 800мм (219шт)</b>									
1		Буріння свердловин діаметром 125 мм при улаштуванні джет-колон в ґрунтах 2 груп. Глибина буріння 7,5 м	м	1642,5	<u>285,45</u> 7,19	<u>270,78</u> 13,65	468852	11810	<u>444756</u> 22420	<u>0,33</u> 0,5206	<u>542,03</u> 855,09
2		Додавати або вилучати на кожний 1 м зміни глибини буріння	м	658,5	<u>219,24</u> 4,58	<u>207,20</u> 10,11	144370	3016	<u>136441</u> 6657	<u>0,21</u> 0,3975	<u>138,29</u> 261,75
3		Ін'єктування свердловини цементним розчином при улаштуванні джет-колон в ґрунтах 2 групи. Умовний діаметр джет-колони 600 мм	м	1732	<u>458,35</u> 14,31	<u>437,72</u> 27,41	793862	24785	<u>758131</u> 47474	<u>0,6375</u> 1,101	<u>1104,11</u> 1906,93

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4		Ін'єктування свердловини цементним розчином при улаштуванні джет–колон в ґрунтах 2 групи. Умовний діаметр джет–колони 800 мм	м	219	<u>560,17</u> 21,18	<u>532,38</u> 33,24	122677	4638	<u>116591</u> 7280	<u>0,944</u> 1,3363	<u>206,73</u> 292,65
5		Портландцемент загальнобудівельного призначення бездобавковий, марка 400	т	802,3	<u>1147,58</u> —	<u>—</u> —	920703	—	<u>—</u> —	<u>—</u> —	<u>—</u> —
6		Свердління отворів в цегляних стінах, товщина стін 0,5 цеглини, діаметр отвору до 20 мм	100шт	1,35	<u>168,08</u> 163,83	<u>—</u> —	227	221	<u>—</u> —	<u>8,87</u> —	<u>11,97</u> —
7		На кожні 0,5 цеглини товщини стіни додавати (товщина стіни 9,2 цеглини)	100шт	1,35	<u>2152,28</u> 2100,59	<u>—</u> —	2906	2836	<u>—</u> —	<u>113,73</u> —	<u>153,54</u> —
8		На кожні 10 мм діаметру отворів понад 20 мм додавати (діаметр отворів 150 мм)	100шт	1,35	<u>1324,65</u> 1296,59	<u>—</u> —	1788	1750	<u>—</u> —	<u>70,2</u> —	<u>94,77</u> —
9		Свердління горизонтальних отворів в бетонних конструкціях при глибині свердління 1000 мм, діаметр отворів 150 мм	1 отвір	84	<u>449,87</u> 187,97	<u>109,71</u> 3,44	37789	15789	<u>9216</u> 289	<u>9,5612</u> 0,1434	<u>803,14</u> 12,05
10		Виключати на кожні 10 мм зміни глибини свердління горизонтальних отворів в бетонних конструкціях, діаметр отворів 150 мм (до глибини 200мм)	1 отвір	–84	<u>301,19</u> 113,37	<u>66,17</u> 2,08	–25300	–9523	<u>–5558</u> –175	<u>5,7664</u> 0,0865	<u>–484,38</u> –7,27
11		Бетонування паль	м3	6,8	<u>80,81</u> 15,92	<u>64,67</u> 17,12	550	108	<u>440</u> 116	<u>0,8</u> 0,6517	<u>5,44</u> 4,43
12		Портландцемент загальнобудівельного призначення бездобавковий, марка 400	т	9,4	<u>1147,58</u> —	<u>—</u> —	10787	—	<u>—</u> —	<u>—</u> —	<u>—</u> —
13		Перевезення ґрунту до 15 км	т	1533,4	<u>57,61</u> —	<u>57,61</u> 4,14	88339	—	<u>88339</u> 6348	<u>—</u> 0,224	<u>—</u> 343,48
		Разом прямі витрати по розділу 1					2567550	55430	<u>1548356</u> 90409		<u>2575,64</u> 3669,11
		Разом будівельні роботи, грн.					2567550				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.					963764				
		всього заробітна плата, грн.					145839				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Загальновиробничі витрати, грн. трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. <b>Всього будівельні роботи, грн.</b>  ----- <b>Всього по розділу 1</b>					109049 741,8 23974 <b>2676599</b>  <b>2676599</b>				
		<b>Розділ 2. Улаштування джет–паль діаметром 700мм з уширенням до 900мм (46шт)</b>									
14		Буріння свердловин діаметром 125 мм при улаштуванні джет–колон в ґрунтах 2 груп. Глибина буріння 7,5 м	м	345	<u>289,16</u> 10,90	<u>270,78</u> 13,65	99760	3761	<u>93419</u> 4709	<u>0,5</u> 0,5206	<u>172,5</u> 179,61
15		Додавати або вилучати на кожний 1 м зміни глибини буріння	м	30	<u>221,42</u> 6,76	<u>207,20</u> 10,11	6643	203	<u>6216</u> 303	<u>0,31</u> 0,3975	<u>9,3</u> 11,93
16		Ін'єктування свердловини цементним розчином при улаштуванні джет–колон в ґрунтах 2 групи. Умовний діаметр джет– колон 700 мм (з уширенням до 900мм)	м	322	<u>560,20</u> 21,21	<u>532,38</u> 33,24	180384	6830	<u>171426</u> 10703	<u>0,945</u> 1,3363	<u>304,29</u> 430,29
17		Портландцемент загальнобудівельного призначення бездобавковий, марка 400	т	149,5	<u>1147,58</u> —	<u>—</u> —	171563	—	<u>—</u> —	<u>—</u> —	<u>—</u> —
18		Свердлення отворів в цегляних стінах, товщина стін 0,5 цеглини, діаметр отвору до 20 мм	100шт	0,28	<u>168,08</u> 163,83	<u>—</u> —	47	46	<u>—</u> —	<u>8,87</u> —	<u>2,48</u> —
19		На кожні 0,5 цеглини товщини стіни додавати (товщина стіни 9,2 цеглини)	100шт	0,28	<u>2152,28</u> 2100,59	<u>—</u> —	603	588	<u>—</u> —	<u>113,73</u> —	<u>31,84</u> —
20		На кожні 10 мм діаметру отворів понад 20 мм додавати (діаметр отворів 150 мм)	100шт	0,28	<u>1324,65</u> 1296,59	<u>—</u> —	371	363	<u>—</u> —	<u>70,2</u> —	<u>19,66</u> —
21		Свердління горизонтальних отворів в бетонних конструкціях при глибині свердління 1000 мм, діаметр отворів 150 мм	1 отвір	18	<u>449,87</u> 187,97	<u>109,71</u> 3,44	8098	3383	<u>1975</u> 62	<u>9,5612</u> 0,1434	<u>172,1</u> 2,58

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22		Виключати на кожні 10 мм зміни глибини свердління горизонтальних отворів в бетонних конструкціях, діаметр отворів 150 мм (до глибини 200мм)	1 отвір	-18	<u>301,19</u> 113,37	<u>66,17</u> 2,08	-5421	-2041	<u>-1191</u> -37	<u>5,7664</u> 0,0865	<u>-103,8</u> -1,56
23		Бетонування паль	м3	2	<u>337,96</u> 15,92	<u>64,67</u> 17,12	676	32	<u>129</u> 34	<u>0,8</u> 0,6517	<u>1,6</u> 1,3
24		Портландцемент загальнобудівельного призначення бездобавковий, марка 400	т	2,8	<u>1147,58</u> -	<u>-</u> -	3213	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
25		Перевезення ґрунту до 15 км	т	346,8	<u>57,61</u> -	<u>57,61</u> 4,14	19979	-	<u>19979</u> 1436	<u>-</u> 0,224	<u>-</u> 77,68
Разом прямі витрати по розділу 2							485916	13165	<u>291953</u> 17210		<u>609,97</u> 701,83
Разом будівельні роботи, грн. в тому числі: вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. всього заробітна плата, грн. Загальновиробничі витрати, грн. трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. <b>Всього будівельні роботи, грн.</b>							485916				
-----							180798				
							30375				
							22794				
							155,71				
							5033				
							<b>508710</b>				
<b>Всього по розділу 2</b>							<b>508710</b>				
<b>Розділ 3. Улаштування ніш в цегляному муруванні</b>											
26		Розбирання цегляних стін	м3	19,5	<u>362,32</u> 238,07	<u>124,25</u> 29,88	7065	4642	<u>2423</u> 583	<u>12,4126</u> 1,475	<u>242,05</u> 28,76
27		Встановлення арматури окремими стрижнями із в'язанням вузлів в масиви, окремі фундаменти і плитні основи з арматурою у вигляді плоских сіток, діаметр арматури, мм понад 6 до 8	т	0,8	<u>805,95</u> 769,30	<u>-</u> -	645	615	<u>-</u> -	<u>38,6582</u> -	<u>30,93</u> -
28		Гарячекатана арматурна сталь гладка, клас А-1, діаметр 6 мм	т	0,808	<u>11337,33</u> -	<u>-</u> -	9161	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
29		Встановлення арматури окремими стрижнями із в'язанням вузлів в масиви, окремі фундаменти і плитні основи з арматурою у вигляді плоских сіток, діаметр арматури, мм понад 8 до 12	т	0,3	<u>576,41</u> 541,69	<u>—</u> —	173	163	<u>—</u> —	<u>27,2208</u> —	<u>8,17</u> —
30		Гарячекатана арматурна сталь гладка, клас А-1, діаметр 12 мм	т	0,303	<u>11306,73</u> —	<u>—</u> —	3426	—	<u>—</u> —	<u>—</u> —	<u>—</u> —
31		Закладення бетоном технологічних ніш	100м3	0,195	<u>98771,27</u> 6414,35	<u>—</u> —	19260	1251	<u>—</u> —	<u>330,296</u> —	<u>64,41</u> —
Разом прямі витрати по розділу 3							39730	6671	<u>2423</u> 583		<u>345,56</u> 28,76
Разом будівельні роботи, грн.							39730				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.							30636				
всього заробітна плата, грн.							7254				
Загальновиробничі витрати, грн.							5969				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.							44,92				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							1452				
<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>							<b>45699</b>				
-----											
<b>Всього по розділу 3</b>							<b>45699</b>				
<b>Розділ 4. Улаштування шурфів</b>											
32		Копання ям для стояків і стовпів вручну без кріплень, без укосів, глибиною до 0,7 м, група ґрунтів 2	100м3	0,04	<u>8486,70</u> 8486,70	<u>—</u> —	339	339	<u>—</u> —	<u>504,56</u> —	<u>20,18</u> —
Разом прямі витрати по розділу 4							339	339	<u>—</u> —		<u>20,18</u> —
Разом будівельні роботи, грн.							339				
в тому числі:											
всього заробітна плата, грн.							339				
Загальновиробничі витрати, грн.							270				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.							1,98				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							64				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>					<b>609</b>				
		-----									
		<b>Всього по розділу 4</b>					<b>609</b>				
		Разом прямі витрати по кошторису					3093535	75605	<u>1842732</u>		<u>3551,35</u>
									108202		4399,7
		Разом будівельні роботи, грн.					3093535				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн.					1175198				
		всього заробітна плата, грн.					183807				
		Загальновиробничі витрати, грн.					138084				
		трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.					944,41				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					30523				
		<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>					<b>3231619</b>				
		-----									
		<b>Всього по кошторису</b>					<b>3231619</b>				
		<b>Кошторисна трудоємність, люд.год.</b>					<b>8895,46</b>				
		<b>Кошторисна заробітна плата, грн.</b>					<b>214330</b>				

## ДОДАТОК В

## Акти впровадження

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ



**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”  
(ДП НДІБК)**



вул. Івана Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09  
E-mail: niisk-office@ndibk.gov.ua; adm-inst@ndibk.kiev.ua Код ЄДРПОУ 02495431

07.12.2020 № 111-2038

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_



Заст. директора інституту  
з наукової роботи, канд. техн. наук, с.н.с.  
Ю.С. Слюсаренко

\_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДОВІДКА**

про впровадження результатів дисертації на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

**«Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в  
складних геотехнічних умовах»**

(спеціальність 05.15.09 - геотехнічна і гірнича механіка.)

здобувача Національного технічного університету України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»  
**Губашової Валентини Євгенівни.**

Цим підтверджується, що результати дисертаційної роботи Губашової Валентини Євгенівни «Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах» були використані при розробленні розділу 11 «Конструктивні та геотехнічні заходи» ДСТУ-Н Б В.1.1-40:2016 «Настанова щодо проектування будівель і споруд на слабких ґрунтах».

Результати дисертаційної роботи впроваджені при розробленні рекомендацій щодо підсилення основи фундаментів в науково-технічних роботах, що виконувалися по договорам відділення. Для розроблення рекомендацій використана розроблена здобувачем методика розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони, виконаної за струменевою технологією, для виконання підсилення основи фундаментів.

Завідувач відділення досліджень  
технічного стану будівель та споруд  
при небезпечних геологічних процесах,  
с.н.с., канд. техн. наук

В.А. Титаренко



№ 171 / 20  
від 1 грудня 2020р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор ТОВ "ГЕОПІК"

О.Т. Савич

### ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційних досліджень Губашової В.Є.  
"Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої  
цементациї в складних геотехнічних умовах"

м.Київ

1 грудня 2020р.

Технічна рада ТОВ "ГЕОПІК" розглянула матеріали дисертаційних досліджень Губашової В.Є. "Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементациї в складних геотехнічних умовах".

**Визначили:** В час сучасного стрімкого розвитку будівництва в умовах щільної міської забудови, технологія струменевої цементациї все частіше використовується для вирішення багатьох геотехнічних задач. Розрахунок очікуваного діаметру ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією в залежності від типу ґрунтів, є особливо важливим аспектом при виконанні проектної документації технічних рішень із застосуванням ґрунтоцементних елементів.

**Вирішили:** Прийняти, запропоновану Губашовою В.Є., методику розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони, виконаної за струменевою технологією, для виконання проектів із застосуванням ґрунтоцементних елементів.

Головний інженер

Д.В.Гайкін



СП «Основа-Солсиф»  
03150, Україна, г. Київ, ул. Ковпака, 17  
Тел. +38 (044) 300 17 71, факс +38 (044) 300 17 61  
Email: office@osnova-solsif.kiev.ua  
www.osnova-group.com.ua

№ 152  
02 12 2020

**ДОВІДКА**  
**про використання результатів дисертаційних досліджень Губашової В.Є.**  
**"Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої**  
**цементації в складних геотехнічних умовах"**

Технічна рада СП ТОВ "Основа-Солсиф" розглянула матеріали дисертаційних досліджень Губашової В.Є. "Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах".

**Визначили:** отримані залежності швидкості підйому від діаметра ґрунтоцементної колони узагальнюють залежність між геометричною характеристикою ґрунтоцементної колони і технологічним параметром та дозволяють полегшити підхід до вибору робочих параметрів бурового інструменту

**Вирішили:** прийняти запропоновану методику Губашової В.Є. розрахунку та підбору технологічних параметрів для виконання ґрунтоцементних колон на об'єкті "Реставрація з пристосуванням під багатфункціональний комплекс пам'ятки архітектури та містобудування національного значення "Миколаївські ворота з прилеглими будівлями" (охоронний номер 867/24) на вулиці Івана Мазепи, літ. А казарма у місті Києві".

Заступник генерального директора  
з проектування та науки



**Дворник С.О.**

Soletanche Bachy  
280, avenue Napoléon Bonaparte - 92500 RUEIL MA(LMAISON Cedex - FRANCE  
Tél.: +33(0)1 47 76 42 62 - Fax: +33(0)1 47 75 99 10  
Email: info@soletanche-bachy.com  
www.soletanche-bachy.com

A SUBSIDIARY OF  SOLETANCHE BACHY